



UNIVERSITA' DEL TEMPO LIBERO DI GORGONZOLA - APS

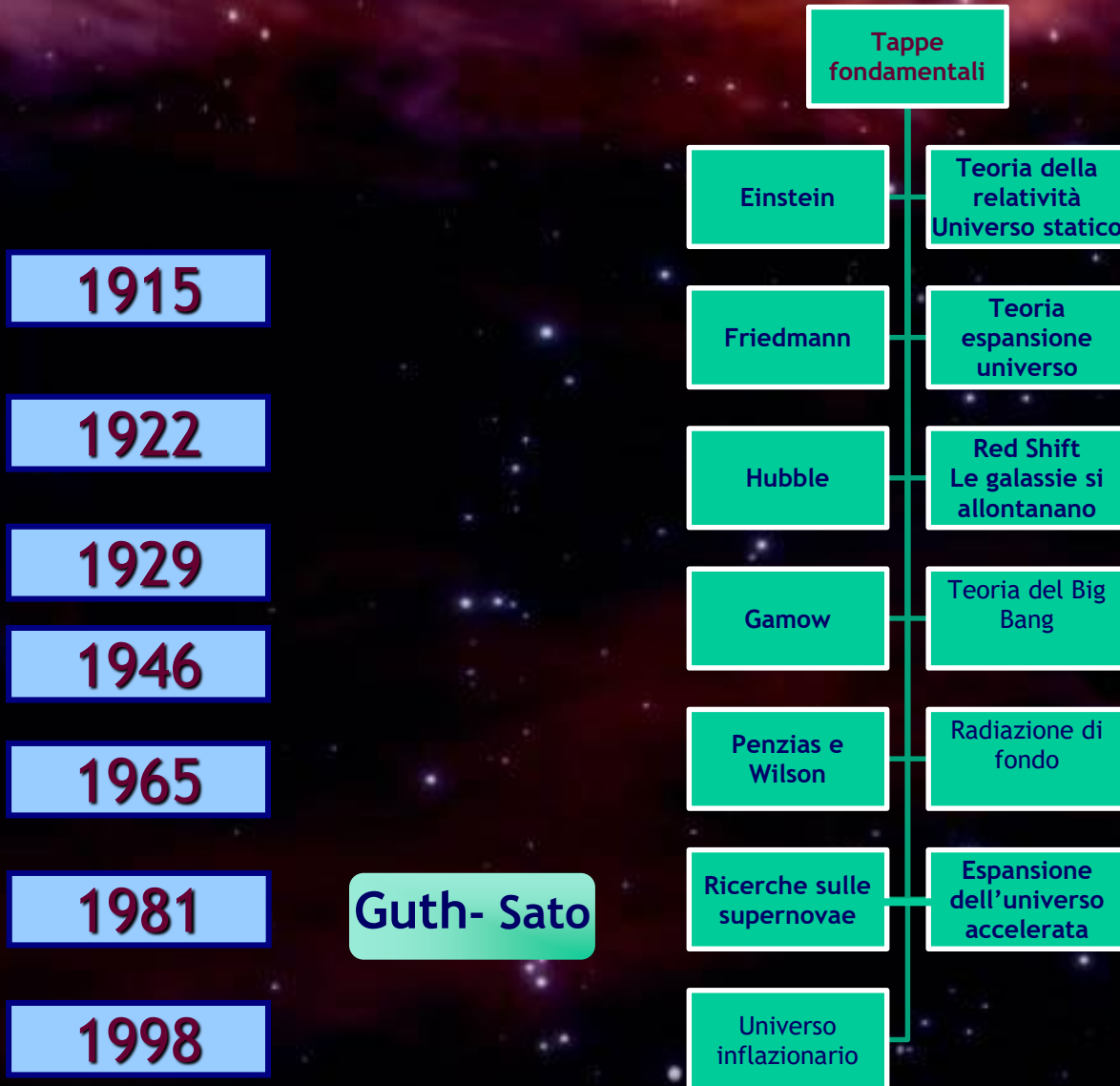
A.A. 2023-2024 - Corso di Astrofisica

La struttura a grande scala dell'Universo

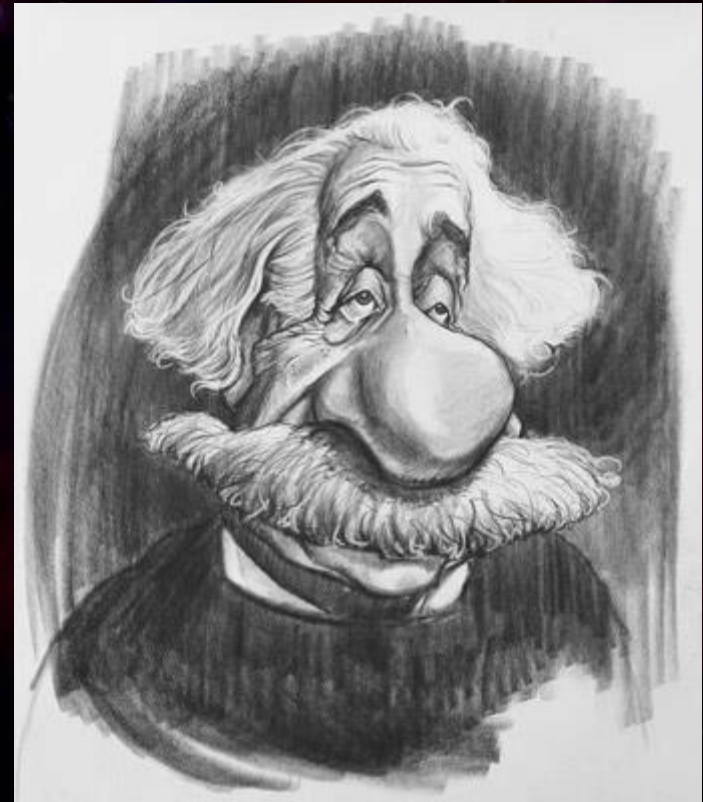
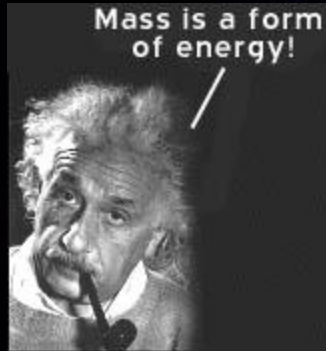
Lezione 3

Dove andremo a finire?
La dinamica dell'espansione
dell'Universo

Cronologia delle scoperte



Il grande non-errore di Einstein



Il grande non-errore di Einstein

- Fu un errore di Albert Einstein a dare il via allo studio sulle origini dell'universo. Fino agli inizi del secolo, le leggi della meccanica classica di Isaac Newton prevedevano che il tempo scorresse sempre e ovunque a una velocità fissa e che lo spazio si estendesse all'infinito in modo uniforme.
- Si credeva insomma in un cosmo infinito e immutabile,
- e non si vedeva la necessità di speculare su un inizio e un'evoluzione dell'universo.

La staticità dell'universo

- ❖ Nel 1916, Einstein pubblicò la teoria della relatività generale e provò ad applicarla alla struttura dell'universo, concludendo che il cosmo si va contraendo sotto l'azione delle forze gravitazionali esercitate da galassie, stelle ecc.
- ❖ Ma poiché all'epoca si pensava che l'universo fosse perenne e immutabile, Einstein aggiunse nella sua teoria una "costante cosmologica", che creava una forza repulsiva in grado quindi di opporsi alla contrazione dell'universo.

Equazione di Einstein classica:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Equazione di Einstein modificata:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^2} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Λ = costante cosmologica

Questo implica che:

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{8\pi G} c^2$$

ρ_{Λ} = densità di energia oscura
(energia del vuoto)

La pressione p sarà quindi:

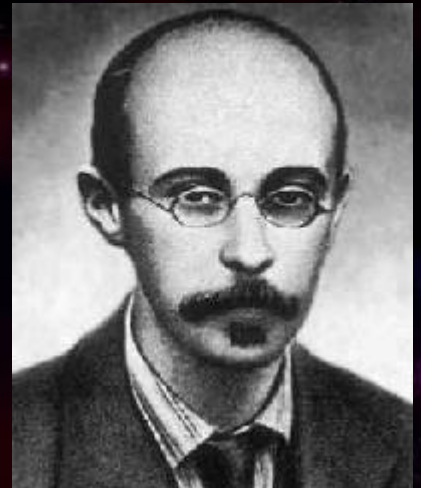
$$p = - \rho_{\Lambda} c^2$$

che essendo negativa è
antigravitazionale

...fa espandere l'Universo.

La teoria di Friedmann

- ❖ *L'uomo che scoprì l'espansione dell'Universo*
- ❖ La teoria di Einstein fu poi perfezionata da un giovane matematico russo, **Aleksandr Aleksandrovich Friedmann** (1888-1925), che ipotizzò tre possibilità a proposito dell'evoluzione dell'universo in base alla densità della materia che contiene.



Equazioni di Friedmann

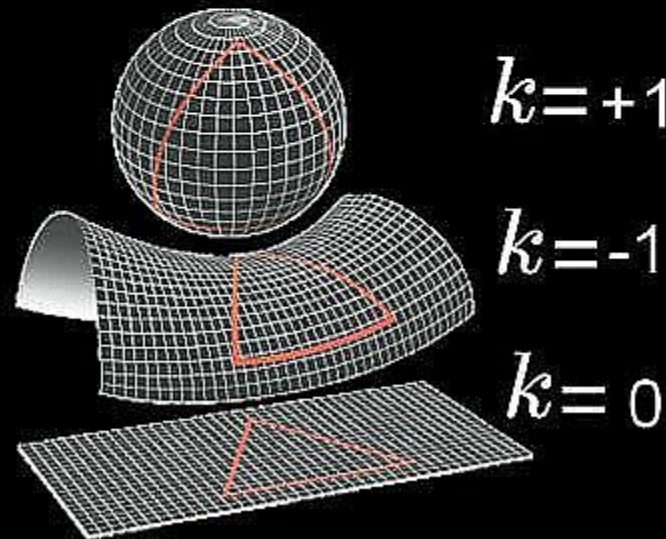
$$\dot{R} = \left[R^2 \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) R + \frac{\Lambda c^2}{3} R$$



Aleksandr Aleksandrovič Fridman
(San Pietroburgo, 6 giugno 1888 –
Pietrogrado, 16 settembre 1925)

- R = Raggio dell'Universo
- \dot{R} = Velocità di espansione
- \ddot{R} = Accelerazione dell'espansione
- ρ = Densità media della materia
- p = Pressione
- c = Velocità della luce
- G = Costante di Gravitazione Universale
- Λ = Costante cosmologica
- k = Parametro di curvatura



La teoria di Friedmann

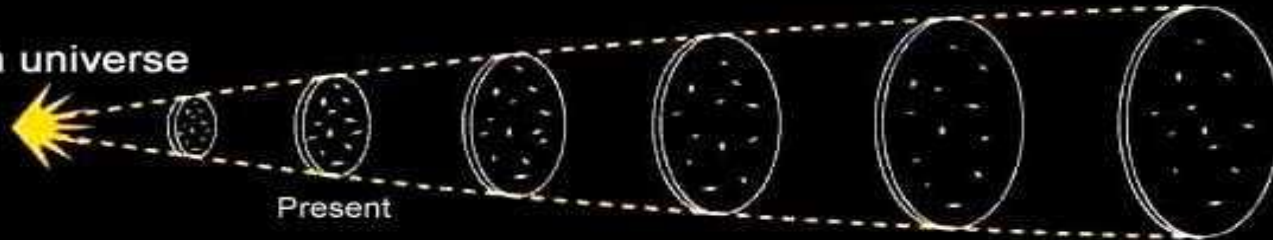


- ❖ un universo in continua espansione,
- ❖ uno che a un certo punto cessa di espandersi e comincia a contrarsi,
- ❖ un altro ancora che continua a espandersi ma di poco e a velocità moderata.

La teoria di Friedmann

Open universe

Big Bang



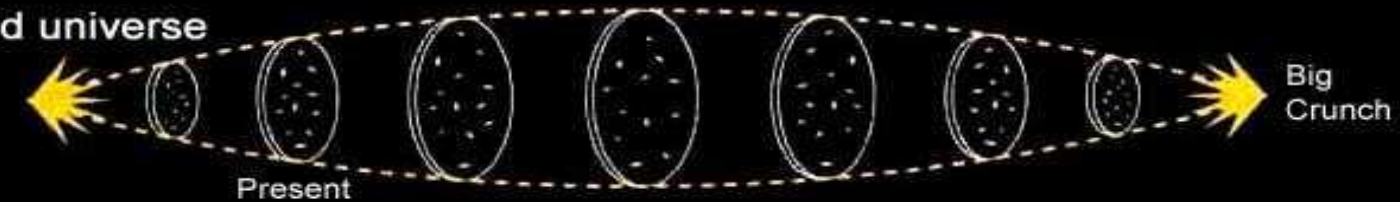
Flat universe

Big Bang



Closed universe

Big Bang



Il Red Shift

Nel 1929, l'astronomo americano Edwin Hubble mostrò che l'universo è in espansione. Misurando la distanza che ci separa da galassie lontane, provò a stabilire a quale velocità si stessero allontanando.

Telescopio di Hubble



L' "effetto Doppler"

Pensate a quando passa un'ambulanza e il suono della sirena diventa da più acuto più grave: è l'"effetto Doppler", dovuto alle variazioni della lunghezza delle onde a seconda della distanza della fonte sonora.

L' "effetto Doppler"

sorgente
in avvicinamento



sorgente
ferma

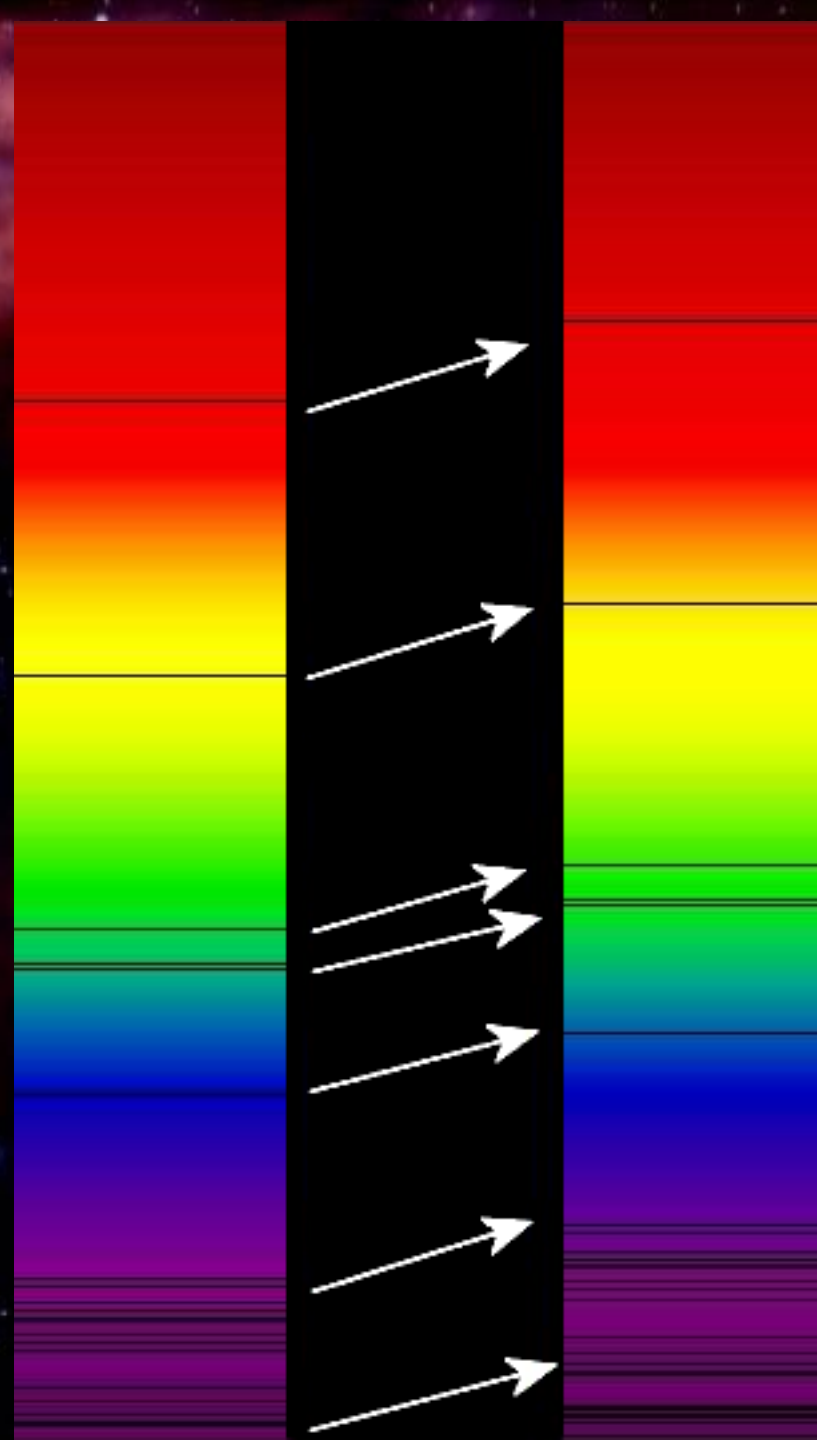


sorgente
in allontanamento



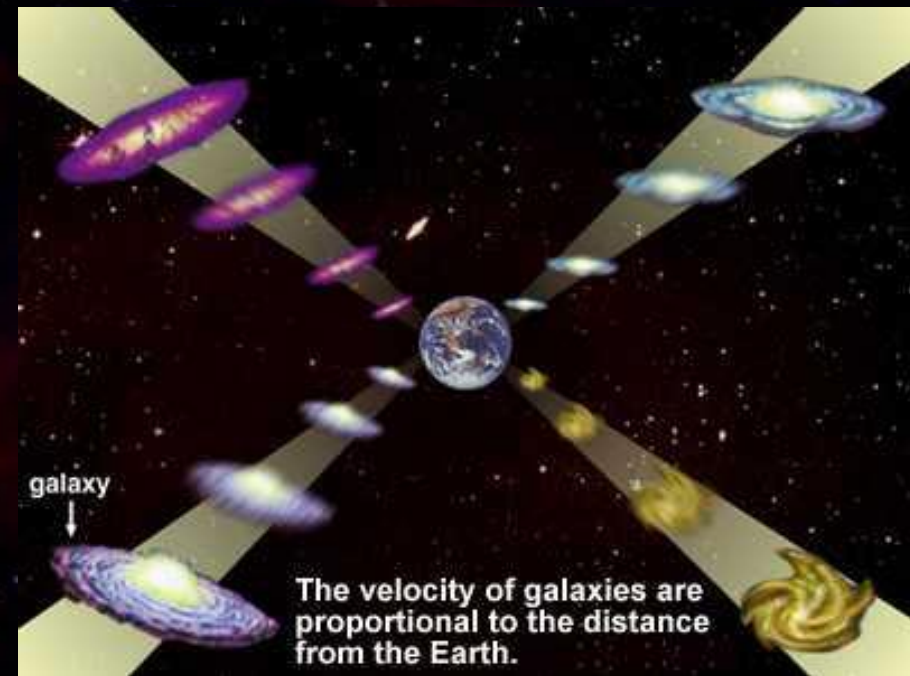
Spostamento verso il rosso

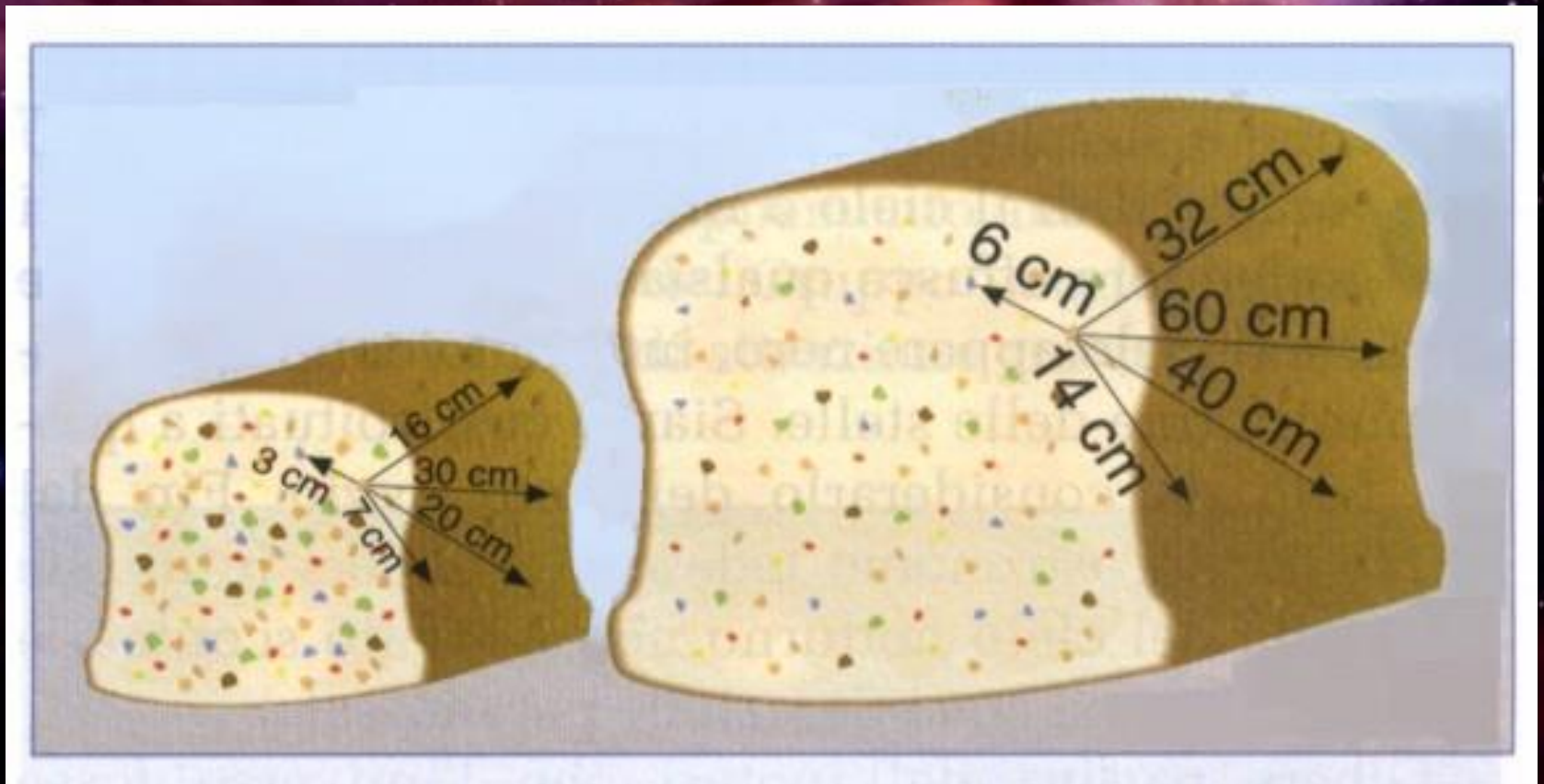
- Un stella in avvicinamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più corte (blueshift)
- Una stella in allontanamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più elevate (redshift)
- La maggior parte delle galassie sembrava fuggire dalla Via Lattea



La Legge di Hubble e l'Universo in espansione

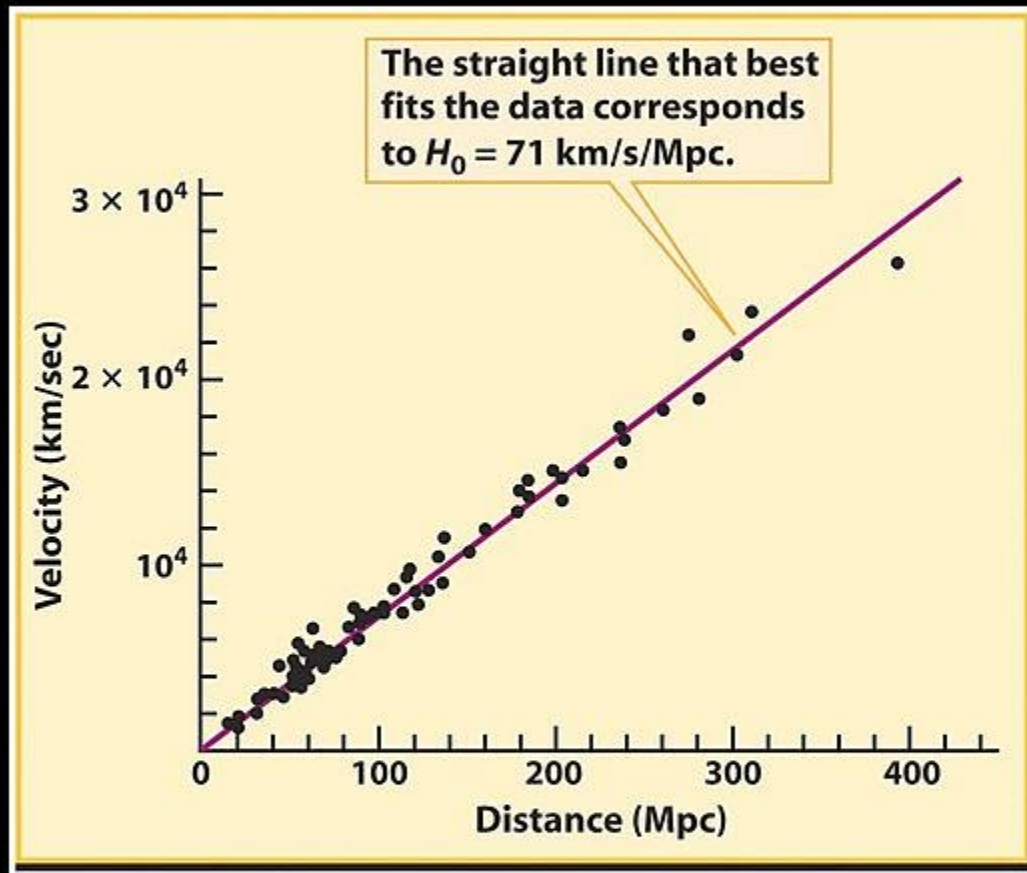
le galassie si allontanano a una velocità maggiore quanto più sono lontane: ciò significa che l'universo si sta espandendo





La lievitazione di un panettone rappresenta un modello per l'espansione dell'universo

La velocità di allontanamento tra i canditi è proporzionale alla loro distanza



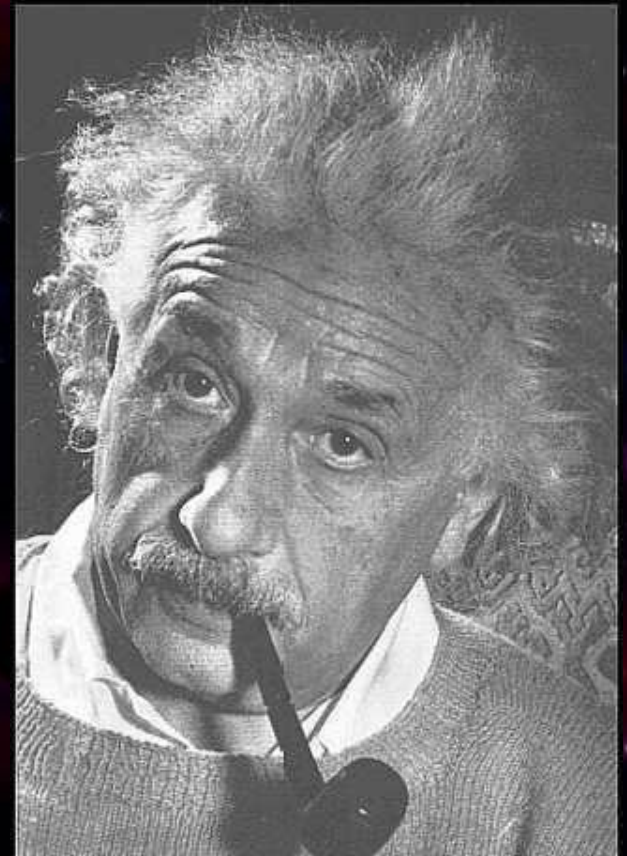
**NEL 1929 EDWIN HUBBLE
SCOPRE L'ESISTENZA DI UNA
RELAZIONE LINEARE TRA
IL REDSHIFT E LA DISTANZA
DELLE GALASSIE.**

**LE GALASSIE SI ALLONTANANO
RECIPROCAMENTE AD UNA
VELOCITA' PROPORZIONALE ALLA
LORO DISTANZA**

LEGGE DI HUBBLE
 $v = H_0 D$

COSTANTE DI HUBBLE
 $H_0 = 71 \text{ (Km/s)/Mpc}$

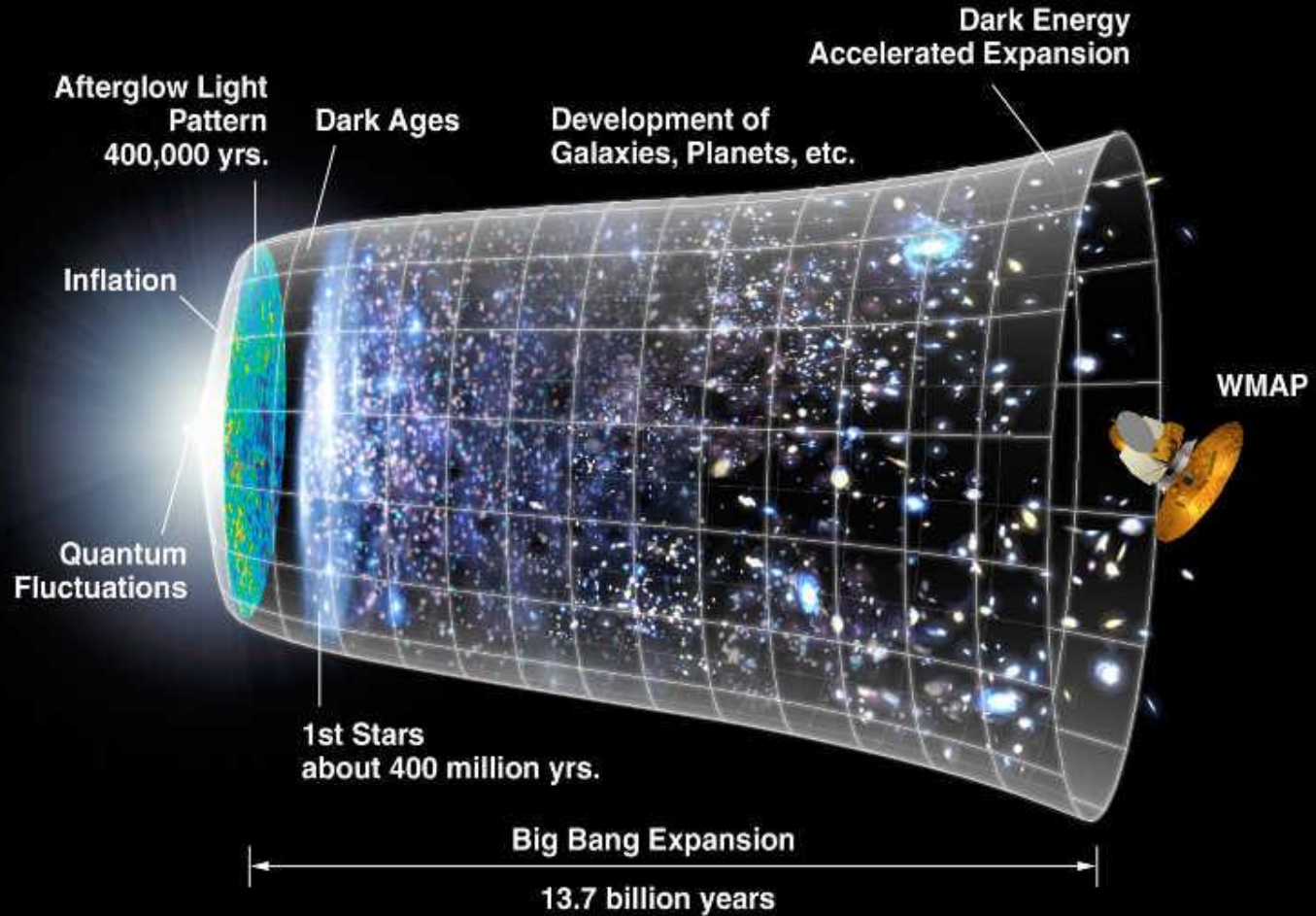
- Quando Einstein seppe di questo risultato definì "il più grande errore della sua vita" la propria teoria sulla costante cosmologica sull'universo immutabile.



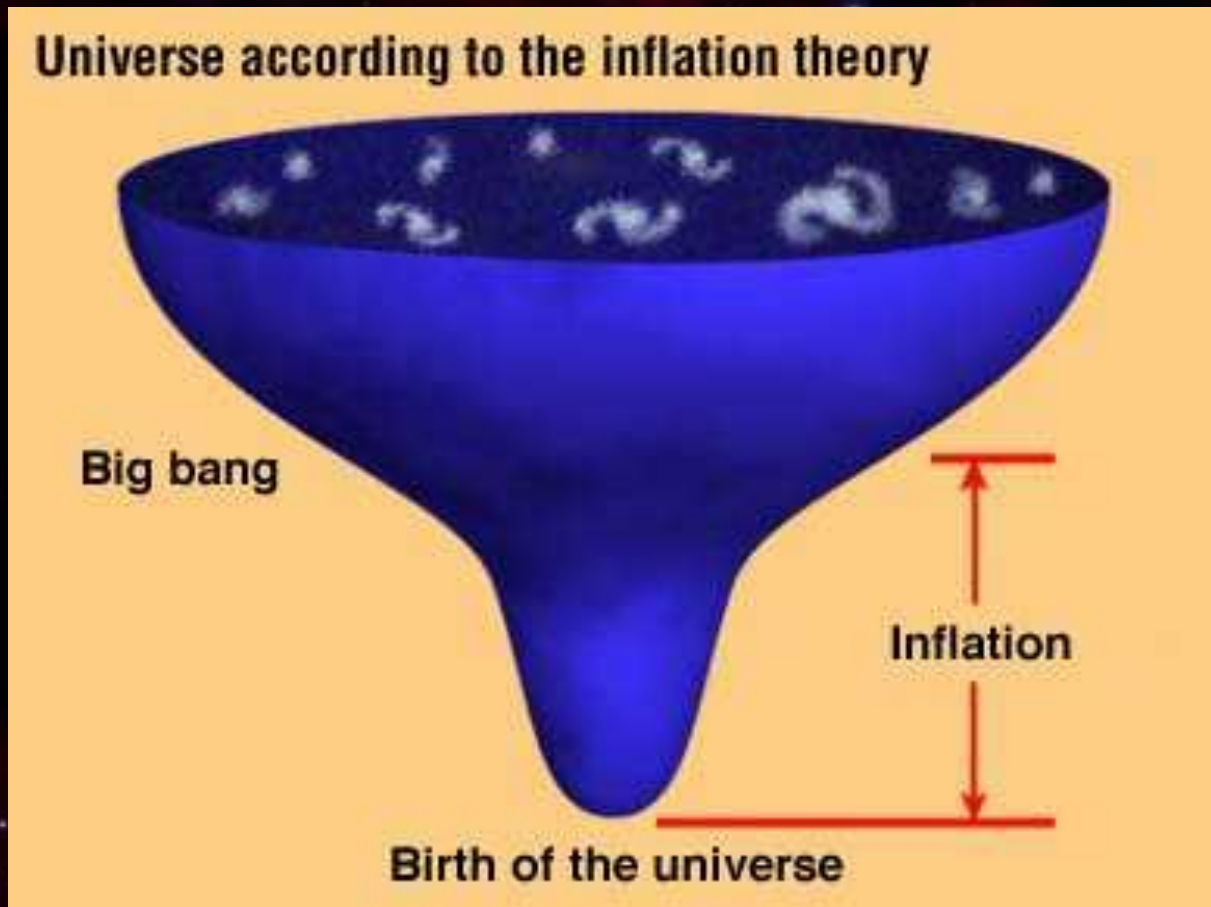
Il Big Bang

- ❖ Nel 1946 l'americano di origine russa **George Gamow** (1904-1968) propose la teoria del Big Bang per spiegare l'origine dell'universo.
- ❖ Questa teoria sostiene che l'universo è nato da una palla di fuoco di altissime densità e temperatura: un superconcentrato gassoso di particelle atomiche come neutroni e protoni da cui si sarebbero formati gli elementi chimici attuali.

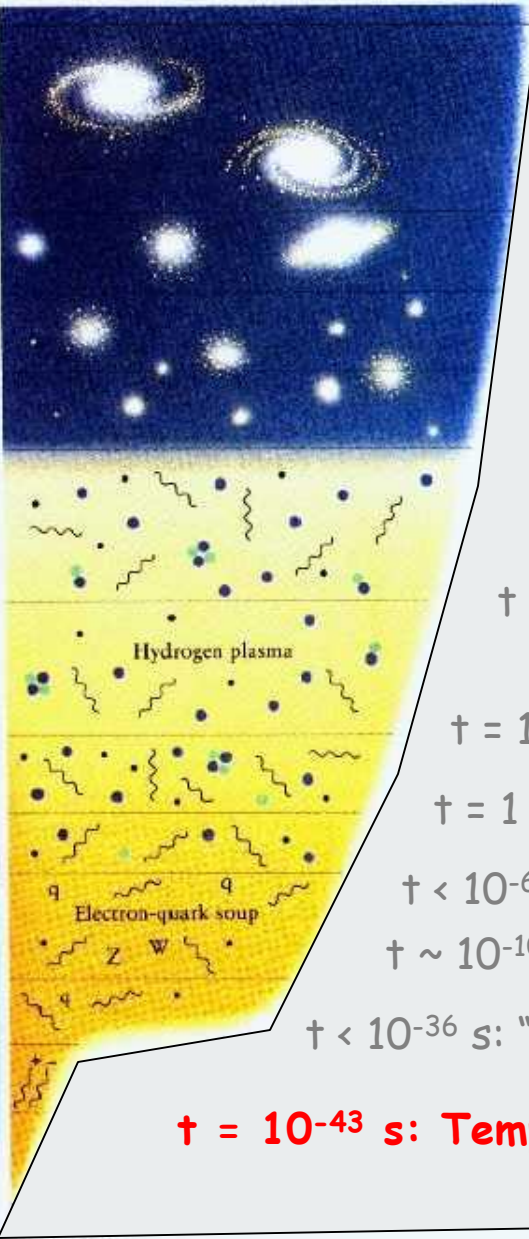
The Big Bang Model



Tutto era concentrato in un sol punto!



A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



$t = 15 \cdot 10^9$ anni: vita , noi, ora, $T = 3$ K

$t = 5 \cdot 10^9$: anni galassie

$t = 1 \cdot 10^9$ anni: Proto-galassie

$t = 3 \cdot 10^5$ anni: Disaccoppiamento materia-radiazione $T=3000$ K

$t = 10^4$ anni: Inizia l'era dominata dalla materia $T= 1.8 \cdot 10^4$ K

$t = 180$ s: Nucleosintesi $T=7.5 \cdot 10^8$ K

$t = 1$ s: Annichilazione elettroni-positroni $T=10^{10}$ K

$t < 10^{-6}$ s: i quarks si combinano in p e n $T=10^{13}$ K

$t \sim 10^{-10}$ s: Separazione forza elettro-debole $T=10^{15}$ K

$t < 10^{-36}$ s: "Era della Grande Unificazione" $T=10^{28}$ K

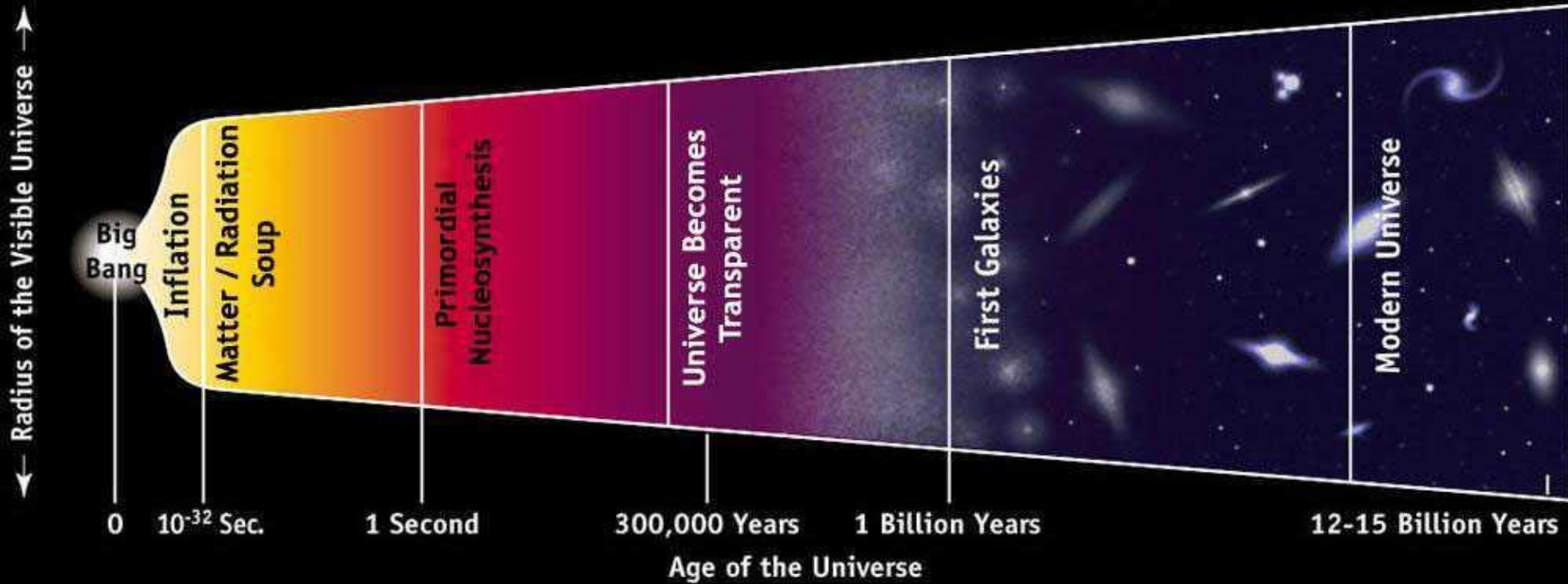
era della materia

era della radiazione

$t = 10^{-43}$ s: Tempo di Planck: Limite della fisica moderna

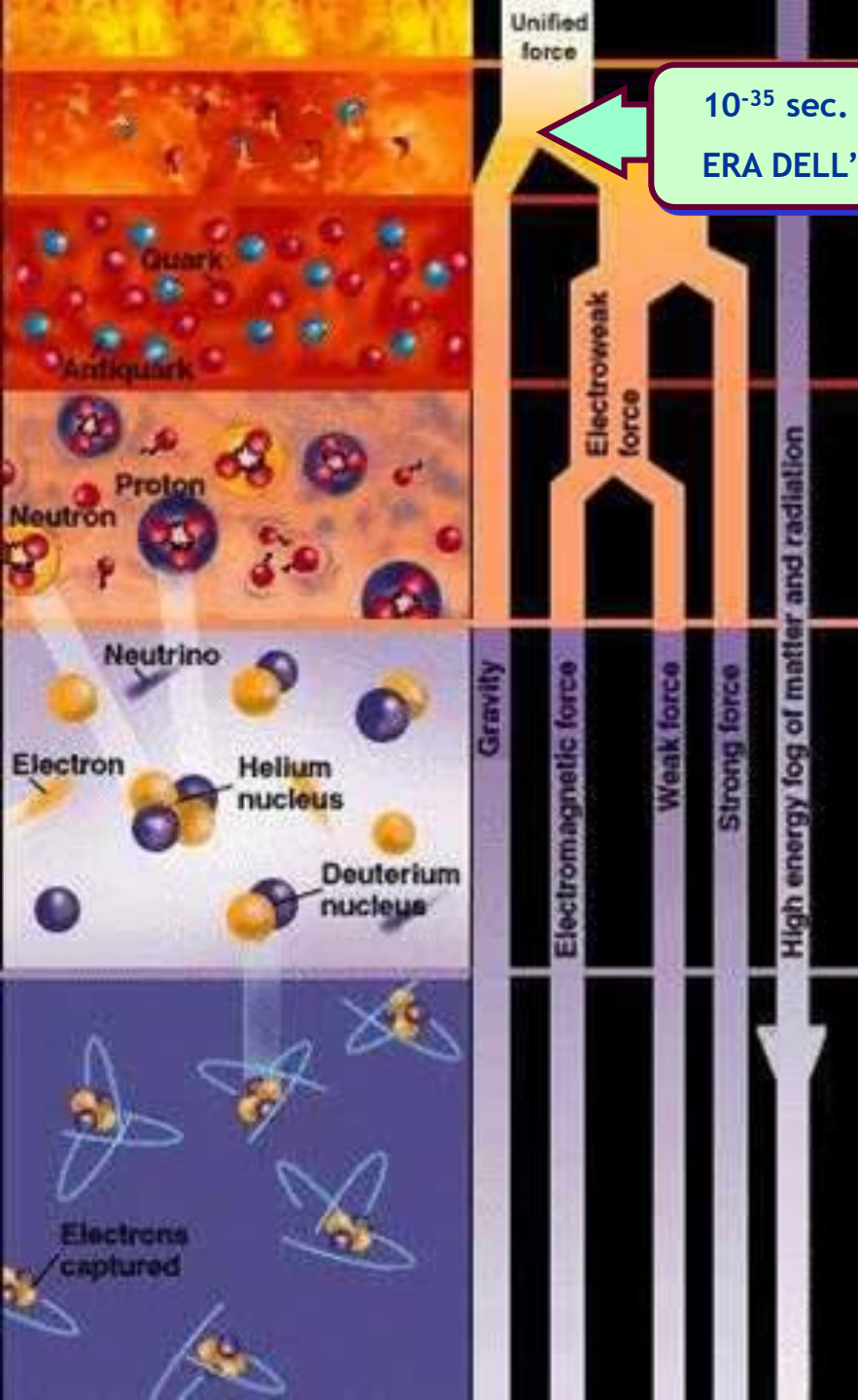
$t \sim 10^{-4}$ s: Era "leptonica"

La storia termica dell'universo



Nascita del tempo e dello spazio

- ❖ Un evento che diede inizio alla scala del tempo e dello spazio. Di conseguenza in origine tutto doveva essere concentrato in un minuscolo punto, dalla densità e gravità infinite, dove il tempo e lo spazio erano pari a zero e la temperatura dell'ordine di miliardi di miliardi di gradi.
- ❖ Cosa ci fosse prima rimane per ora un mistero, visto che nemmeno gli scienziati avanzano ipotesi, ritenendo i momenti anteriori a tale istante come inconoscibili ed inspiegabili da qualsiasi teoria.



10^{-35} sec.

ERA DELL'INFLAZIONE

Il Big Bang

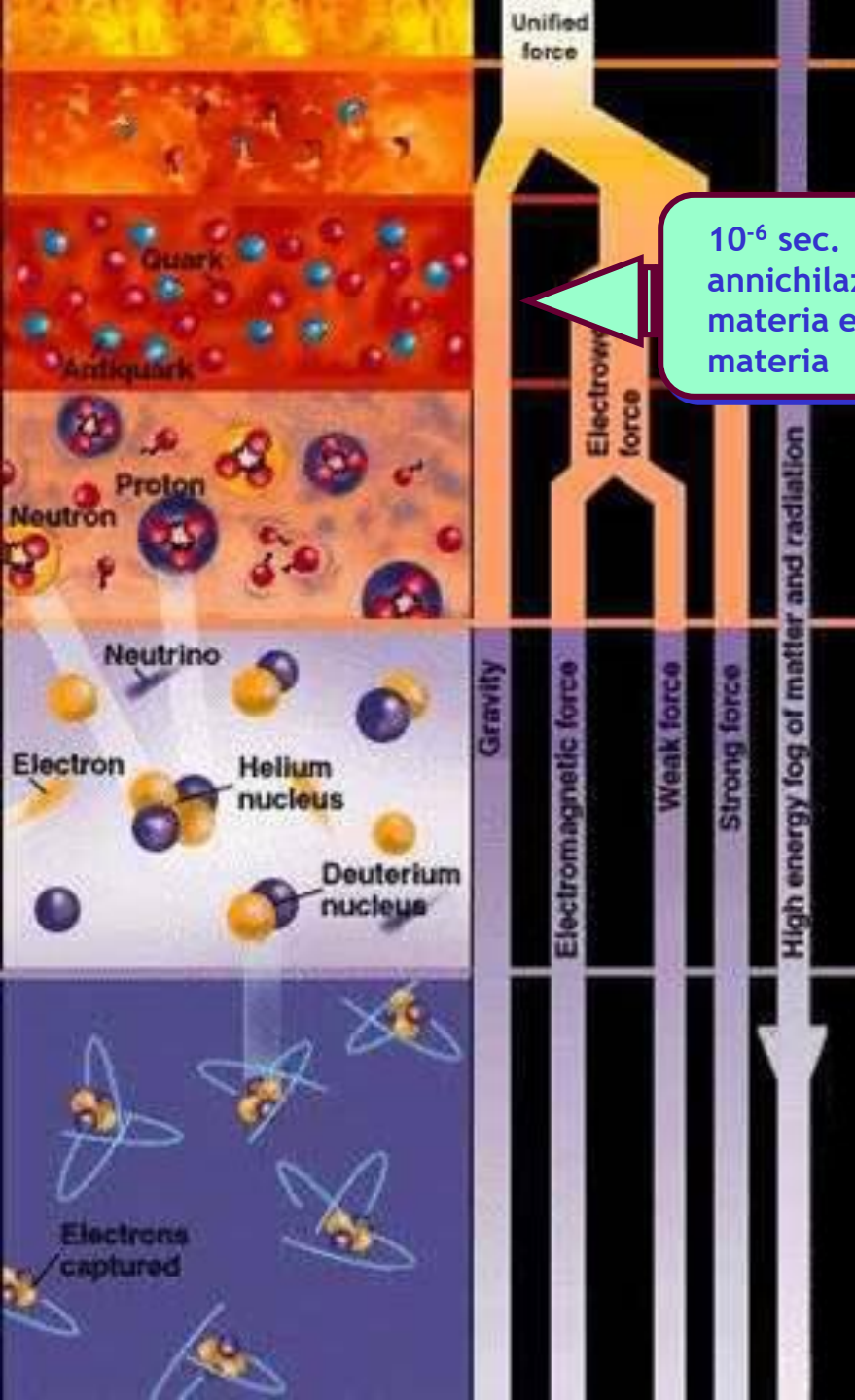
- ❖ Il Big Bang non è stato un'esplosione nello spazio, ma l'espansione dello spazio.
- ❖ Durante l'era dell'inflazione (10^{-35} sec.) l'universo si è espanso fino alle dimensioni di un grosso pompelmo.

Il Big Bang

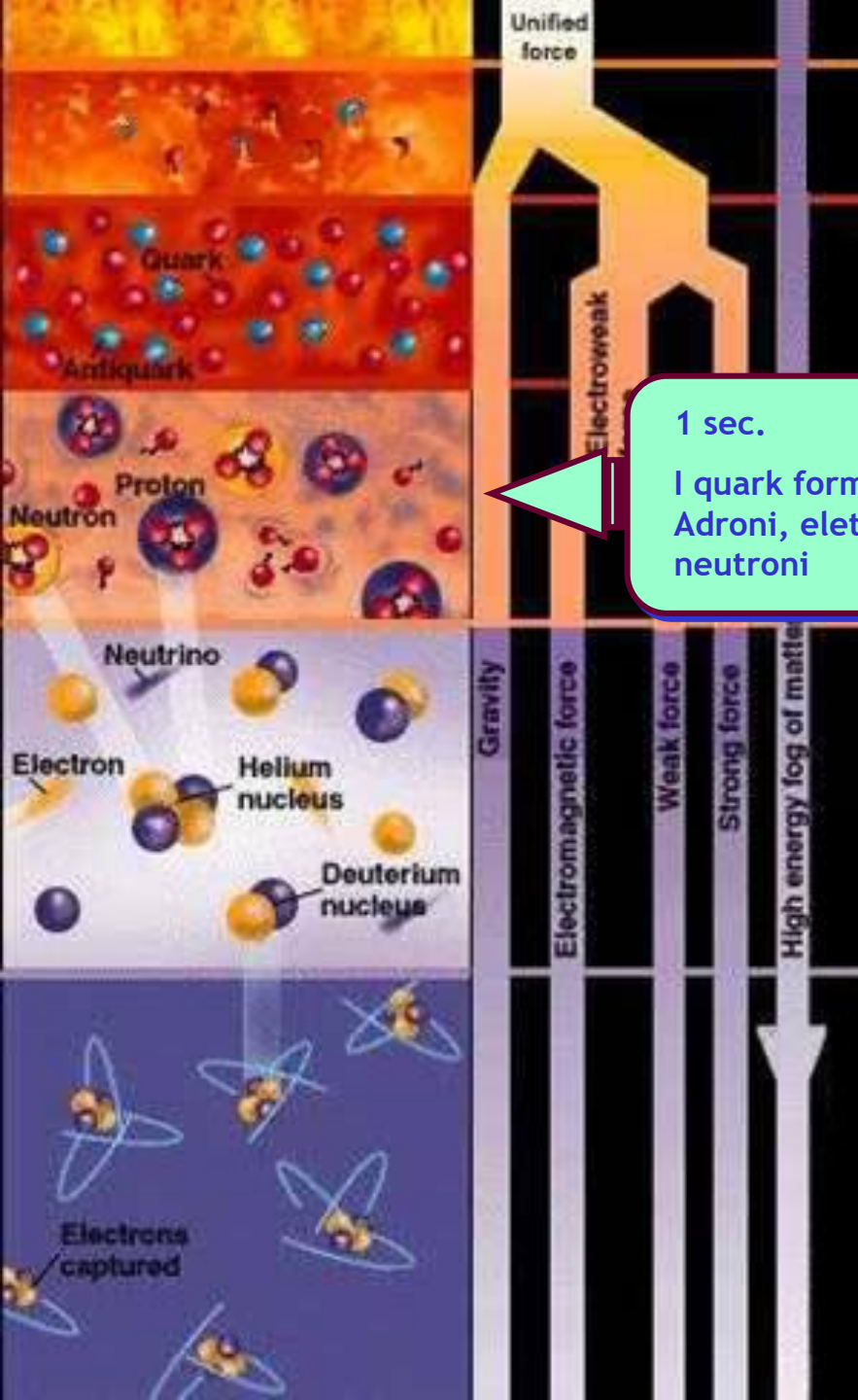
10⁻⁶ sec.
annichilazione di
materia e anti-
materia

ERA DEI QUARK

- ❖ In questa fase si sono formate dall'energia moltissime copie di quark e antiquark, che si annichilano ridiventando energia.



Il Big Bang



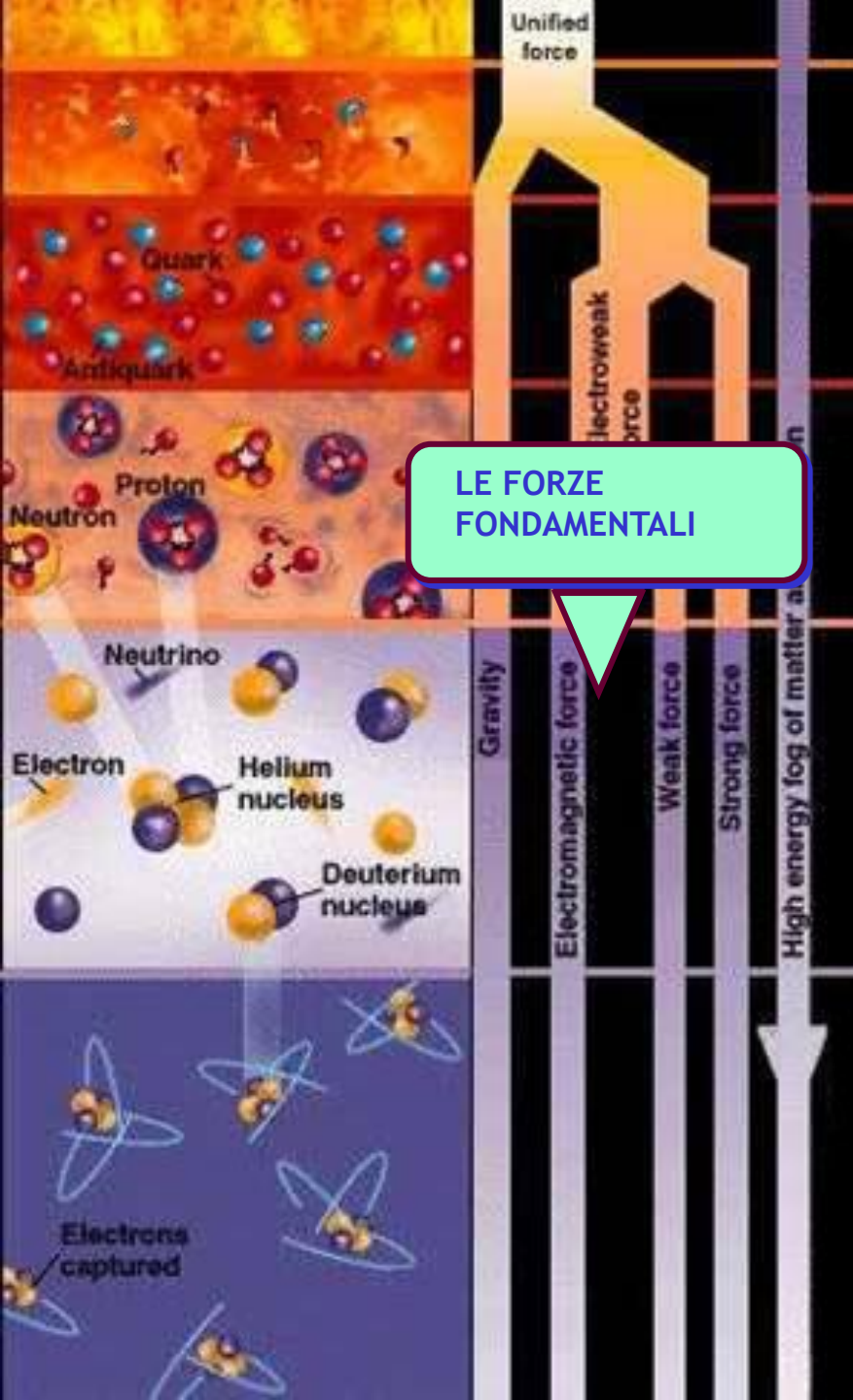
1 sec.

I quark formano
Adroni, elettroni e
neutroni

I PRIMI PROTONI E NEUTRONI

Dopo 1 μ s l'universo era abbastanza freddo perché i quark potessero combinarsi e formare particelle più massicce: protoni e neutroni

Il Big Bang



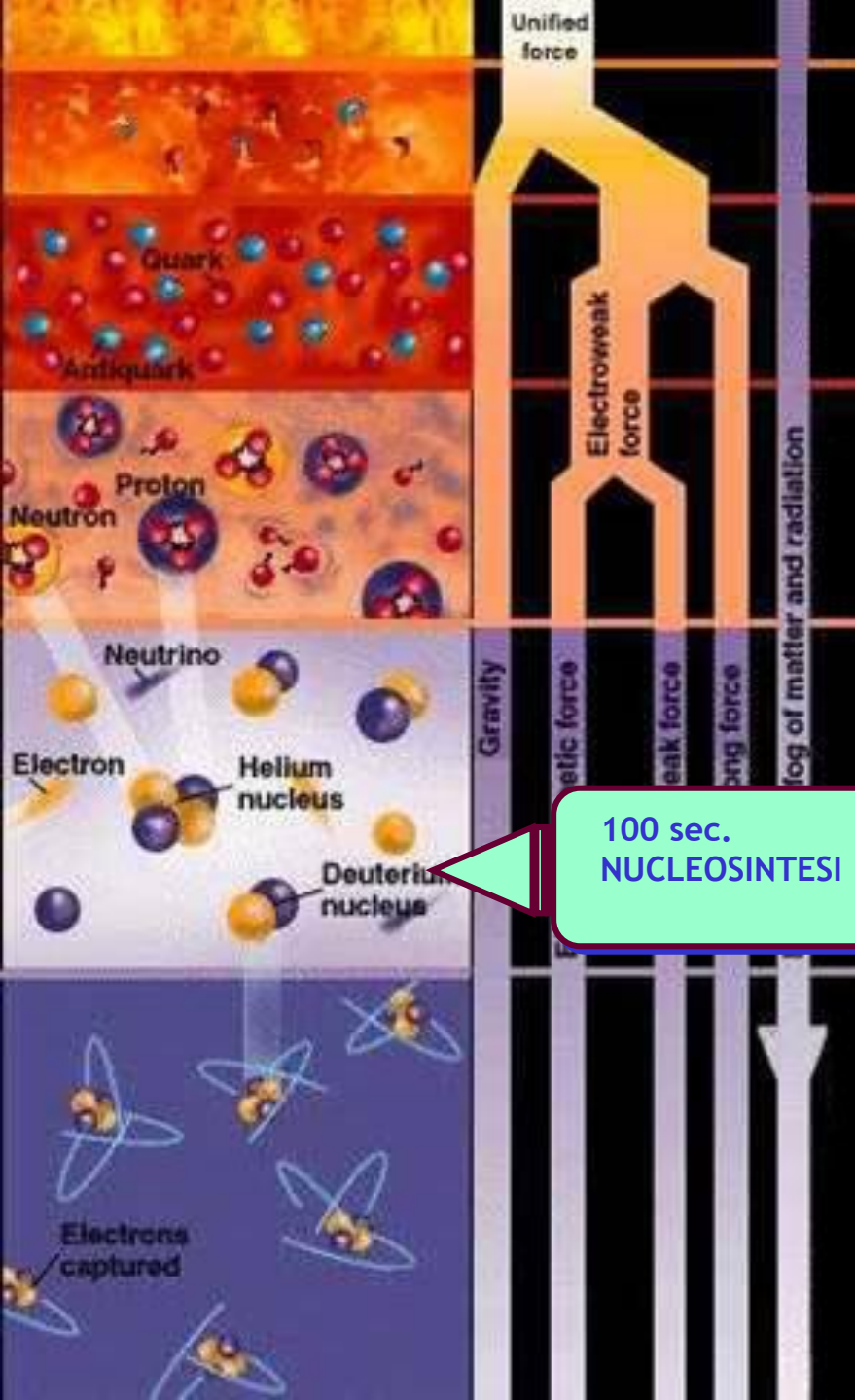
LE FORZE FONDAMENTALI

- Subito dopo entrarono in gioco le forze fondamentali dell'universo, ed alla già esistente forza gravitazionale, che regola l'attrazione fra le masse, si aggiunsero le altre tre che insieme a questa governano l'universo:
 - la forza debole, che agisce a livello atomico,
 - la forza forte che governa i nuclei atomici,
 - la forza elettromagnetica responsabile di tutti i fenomeni elettromagnetici quali la luce, le onde radio, ecc...

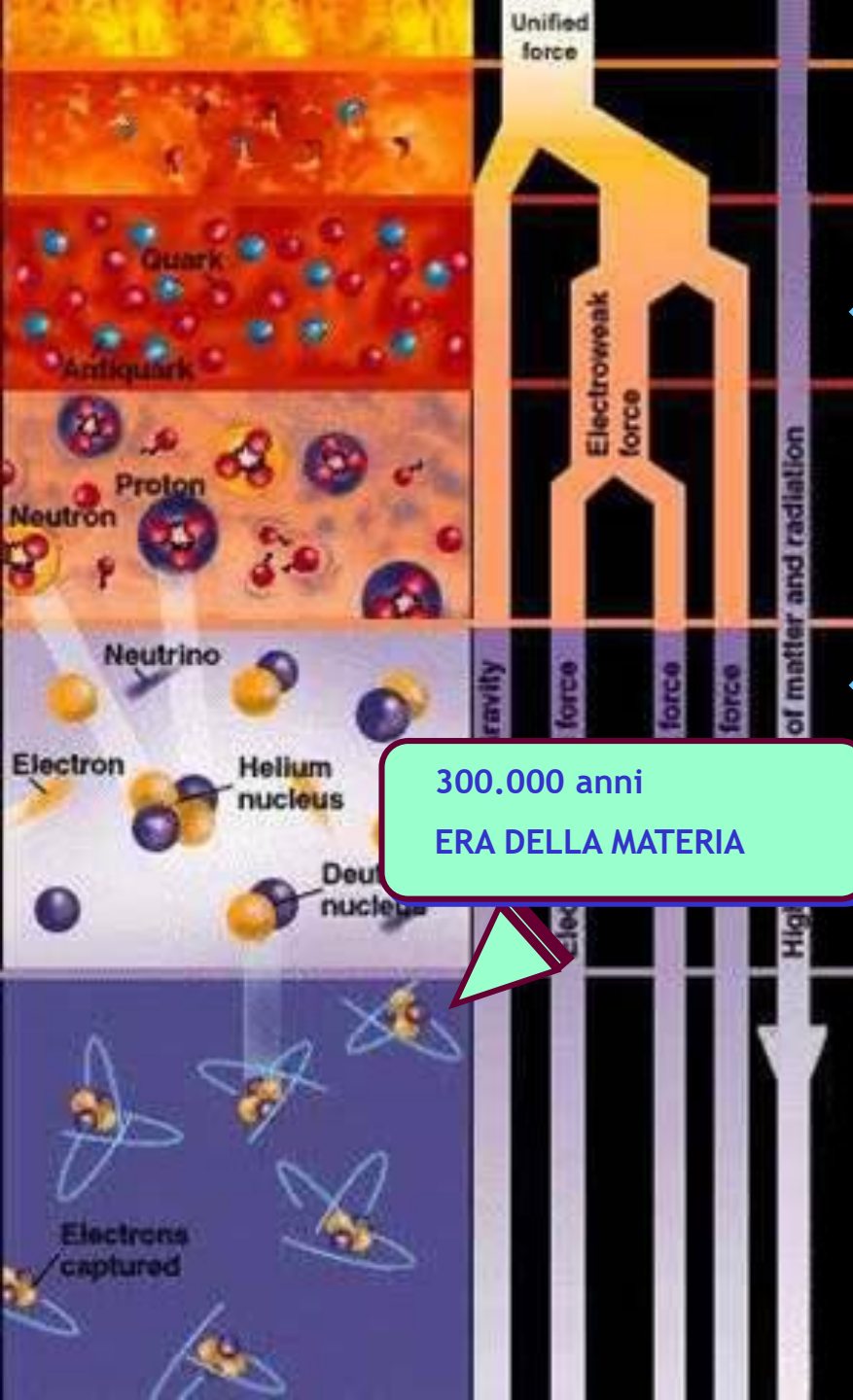
Il Big Bang

- ERA DELLA NUCLEOSINTESI

- In questa fase i neutroni si sono gradualmente trasformati in protoni. Mentre la temperatura dell'universo si abbassava, gradualmente i neutroni si combinavano con i protoni per formare i primi nuclei di elio ognuno formato da 2 protoni e 2 neutroni.



Il Big Bang



300.000 anni

ERA DELLA MATERIA

- ❖ Dopo alcune centinaia di migliaia di anni, l'universo era divenuto ancora meno denso e più freddo, avveniva la "ricombinazione", i protoni e gli elettroni si combinavano per creare i primi atomi di idrogeno.
- ❖ Finiva a quel punto la prima parte della storia dell'universo, quella dominata dalla radiazione, ed iniziava "l'era della materia" che vedeva l'aggregazione delle particelle nelle prime forme atomiche, mentre i fotoni, liberi ormai da ogni vincolo, potevano così irradiarsi in tutte le direzioni sotto forma di radiazione cosmica di fondo.

Formazione delle galassie

- Dopo qualche milione di anni si erano già formati i primi agglomerati di materia, che aggregandosi a loro volta per l'attrazione gravitazionale, daranno vita qualche miliardo di anni dopo alle protogalassie, che, una volta che si saranno evolute in galassie, formeranno le stelle e tutti gli altri corpi celesti.

Le evidenze in favore di una nascita esplosiva del nostro universo (Il Big Bang)

- L'espansione dell'Universo

- La presenza di una radiazione fossile che permea tutto in maniera omogenea ed isotropa

- Una corretta composizione chimica dell'universo primordiale (nucleosintesi)

La teoria del **Big Bang** riesce a spiegare tutte le osservazioni sperimentali



George Gamow



Alexander Friedmann

Una luce antichissima

Ma se il Big Bang si verificò effettivamente.....

E' possibile rintracciare ancora oggi il residuo delle radiazioni elettromagnetiche di quella gigantesca esplosione ?

Una luce antichissima

- In particolare, 300mila anni dopo il Big Bang, quando l'universo era ancora neonato, la sua temperatura si sarebbe abbassata fino a circa 4.000 gradi.
- Ciò avrebbe reso possibile la formazione degli atomi e la palla di fuoco opaca dei primi momenti sarebbe diventata via via più trasparente, consentendo all'universo di diventare visibile.

Una luce antichissima

Si può oggi osservare La luce di quell'epoca ?

- ❖ E' possibile rintracciare nell'universo radiazioni elettromagnetiche che ancora viaggiano a causa dell'espansione dell'universo ?
- ❖ Esiste la cosiddetta "radiazione di fondo dell'universo", teorizzata già nel 1940 dallo stesso Gamow e da un altro grande fisico, Hans Bethe ?.

Una scoperta fortunata

L'emissione di fondo dell'universo fu scoperta per caso nel maggio del 1964 da due ricercatori americani, Arno Penzias e Robert Wilson,



La radiazione di fondo

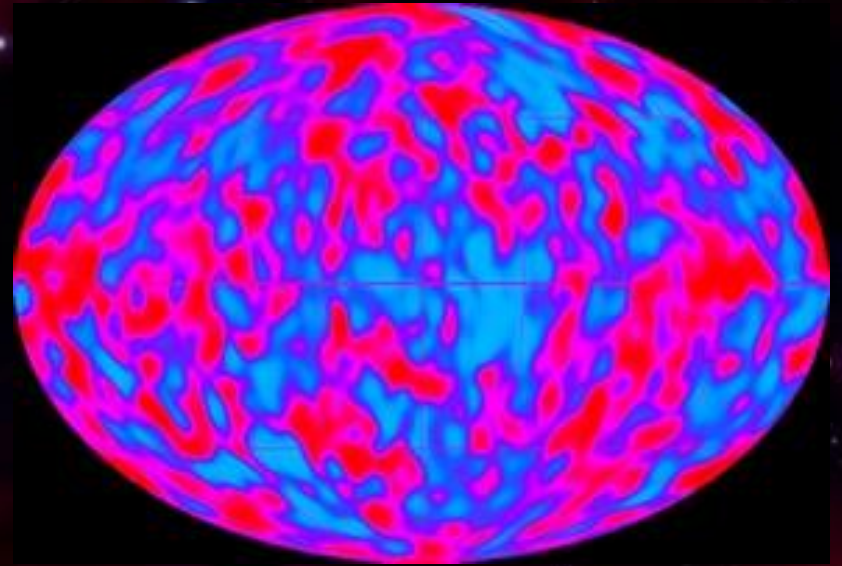
Con l'aiuto del fisico **Robert Dicke** dell'Università di Princeton, che aveva ripreso la teoria di Gamow e Bethe perfezionandola, si capì finalmente che doveva trattarsi proprio della fatidica "radiazione di fondo", chiamata anche "radiazione fossile", prevista dalla teoria del Big Bang.



Scanned at the American
Institute of Physics

La radiazione di fondo

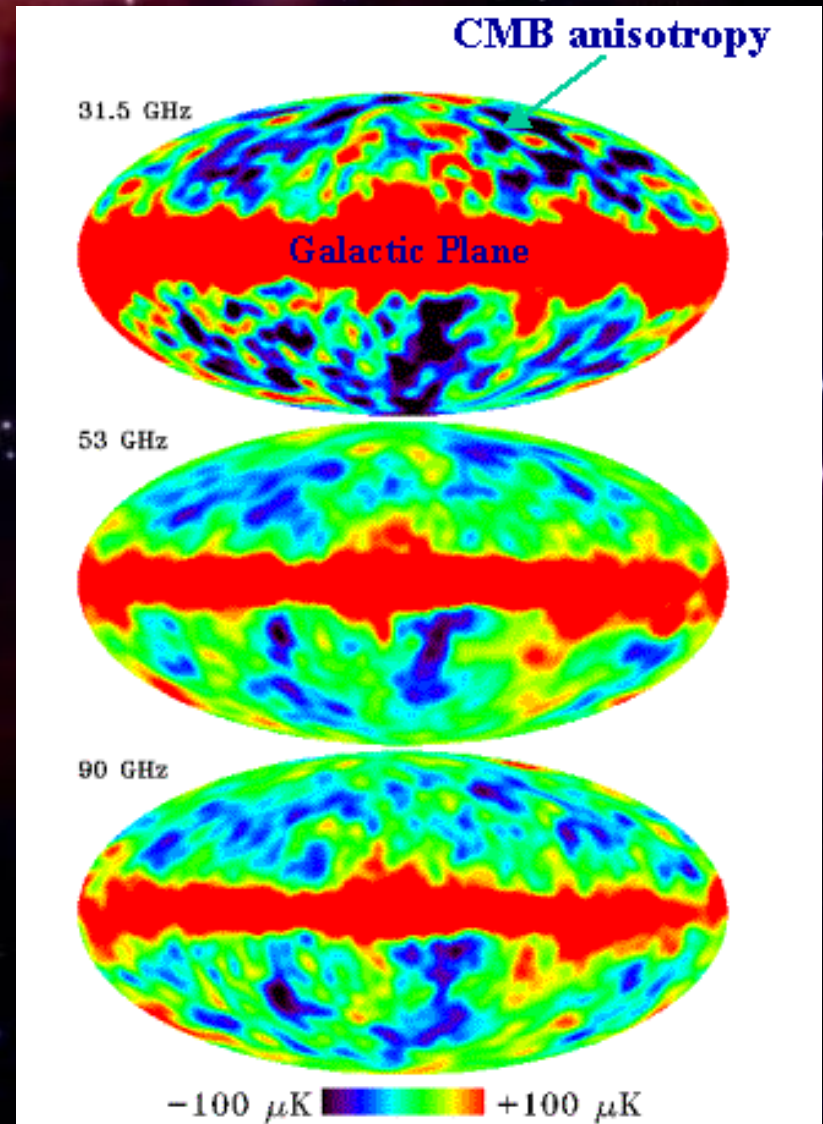
La scoperta del 1964 delle emissioni di fondo dell'universo fu una grande vittoria per i sostenitori della teoria del Big Bang.

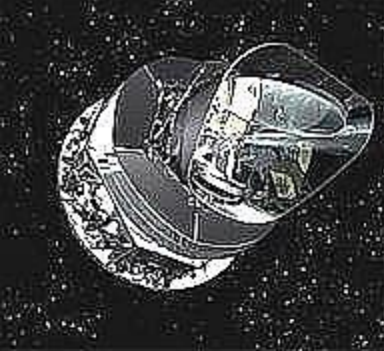


Mapa della radiazione di fondo cosmico a microonde osservata dal satellite COBE

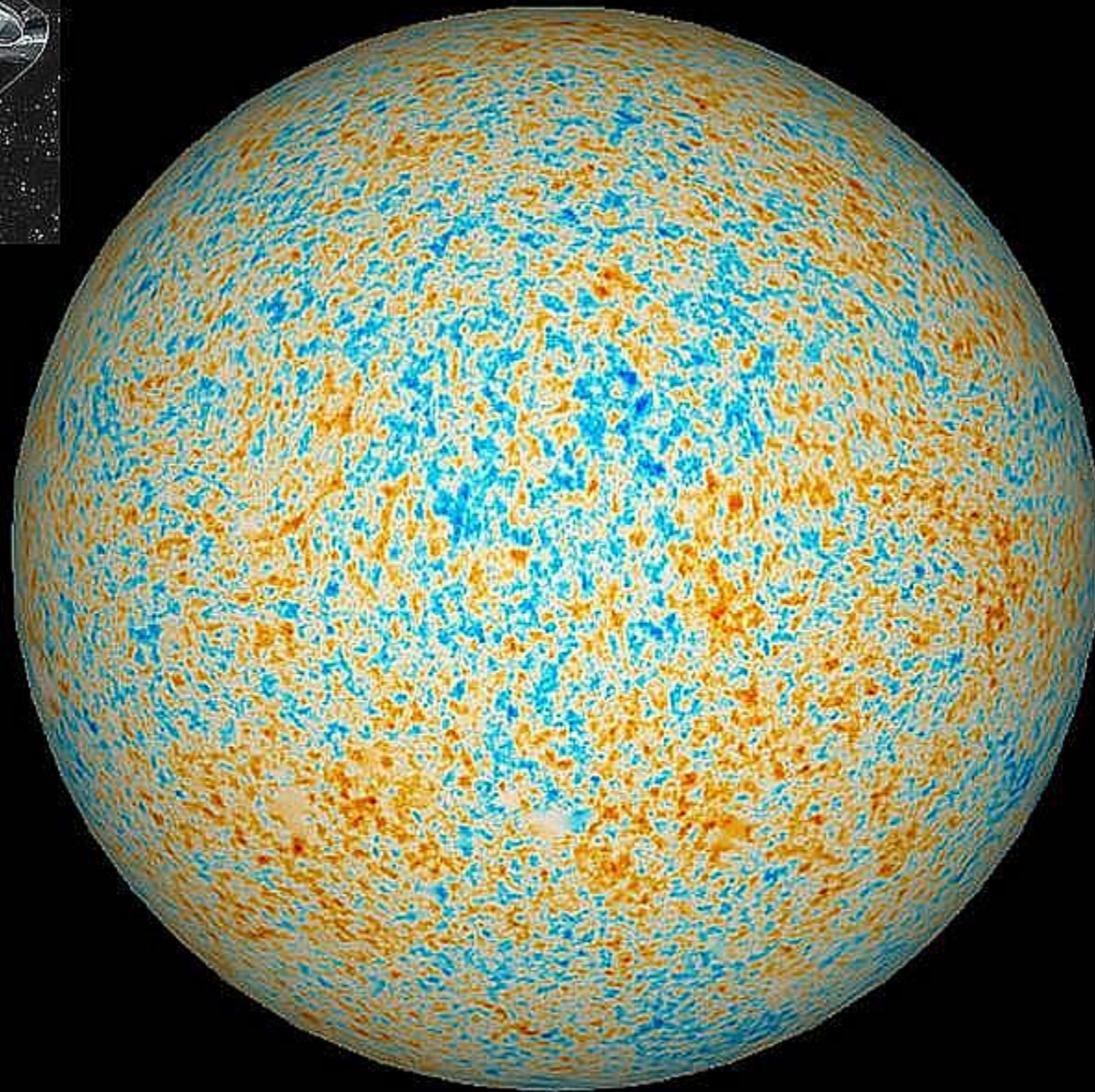
L'universo raffreddatosi dopo il Big Bang conserva traccia dell'esplosione

Una radiazione elettromagnetica omogenea ed isotropa a 3°K che permea l'intero universo





Planck
2018



CMB flux (Cosmic Microwaves Background)
anisotropia termica

Misura della temperatura T dell'Universo mediante la CMB

$$\lambda_{\text{CMB}} = 1 \text{ mm circa}$$

applichiamo la legge di Wien:

$$T = \frac{0.002898}{\lambda_{\text{CMB}}} = 2.898 \text{ }^\circ\text{K}$$

Quanto tempo t ha impiegato
l'Universo a raffreddarsi fino a $3 \text{ }^\circ\text{K}$?

$$t = 4 \times 10^{18} / T^2 = 4.44 \times 10^{17} \text{ sec} \\ = 14 \text{ Gy circa}$$

Calcoliamo la Costante di Hubble:

$$H_0 = 1 / t = 2.25 \times 10^{-18} \text{ secondi}$$

(valore accettato: 2.35×10^{-18} secondi)

Rimane ora da calcolare il
Raggio R dell'Universo:

$$R = c / H_0 = 1.33 \times 10^{26} \text{ metri} \\ = 14 \times 10^9 \text{ A.L.}$$

Densità media:

$$\bar{\rho} = \frac{3 H_0^2}{8 G \pi} = 9.06 \times 10^{-27} \text{ Kg / m}^3$$

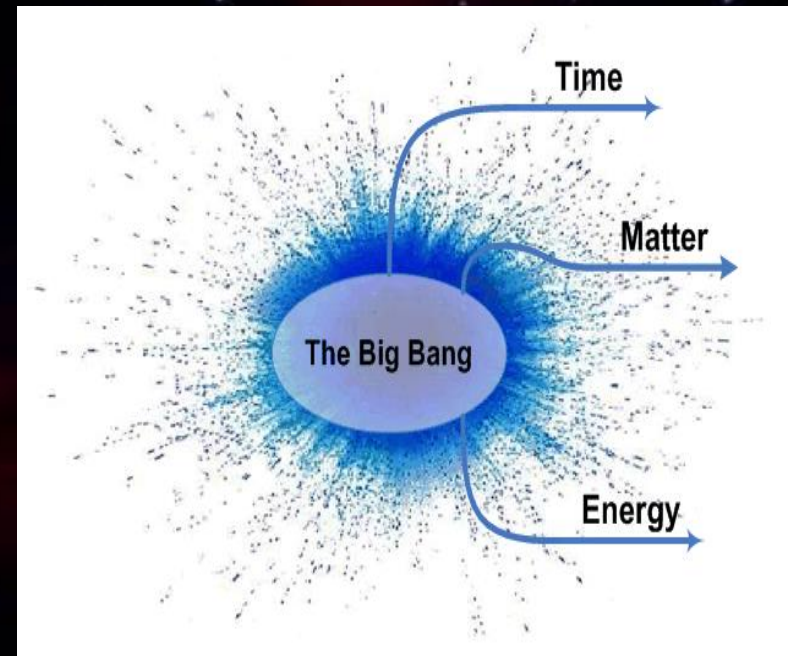
... e ora la massa M
dell'Universo:

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \bar{\rho} = 8.93 \times 10^{52} \text{ Kg}$$

...supposto sferico ($k = +1$)

L'universo inflazionario

- Nel 1981 l'americano Alan Guth del Massachusetts Institute of Technology e il giapponese Kazuhiro Sato presentarono, indipendentemente l'uno dall'altro, la teoria dell'"universo inflazionario"

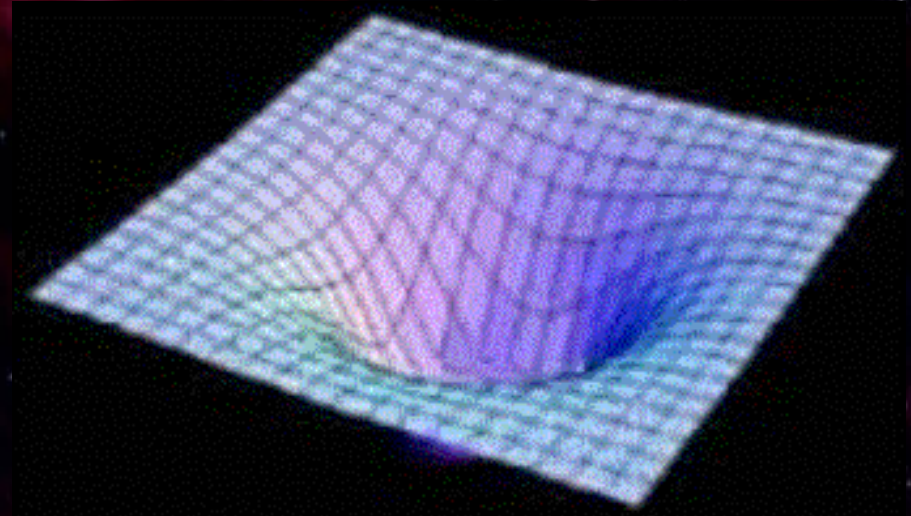


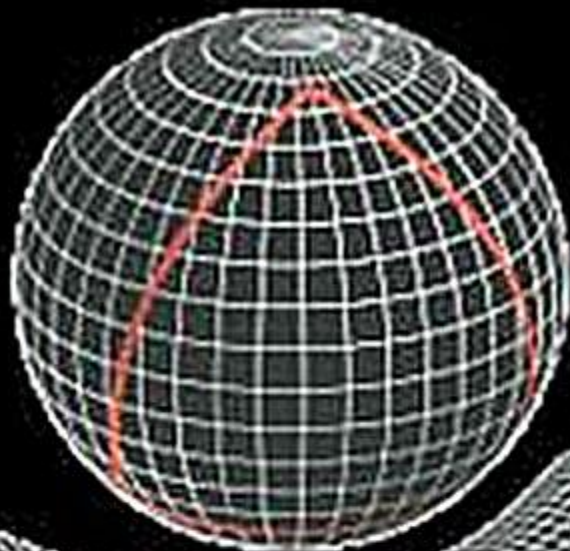
L'universo inflazionario

- Si tratta di una teoria secondo la quale il super-microuniverso si sarebbe espanso, alla nascita, in una maniera vertiginosa:
- in un solo decimo di milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo (10^{-34} secondi) avrebbe aumentato il suo volume di dieci miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte (1 con 100 zeri)
- Per spiegare questa improvvisa espansione dell'universo appena nato, i due fisici hanno ipotizzato che il vuoto stesso, cioè la condizione dell'universo prima del Big Bang, fosse un "vuoto ad alta energia".

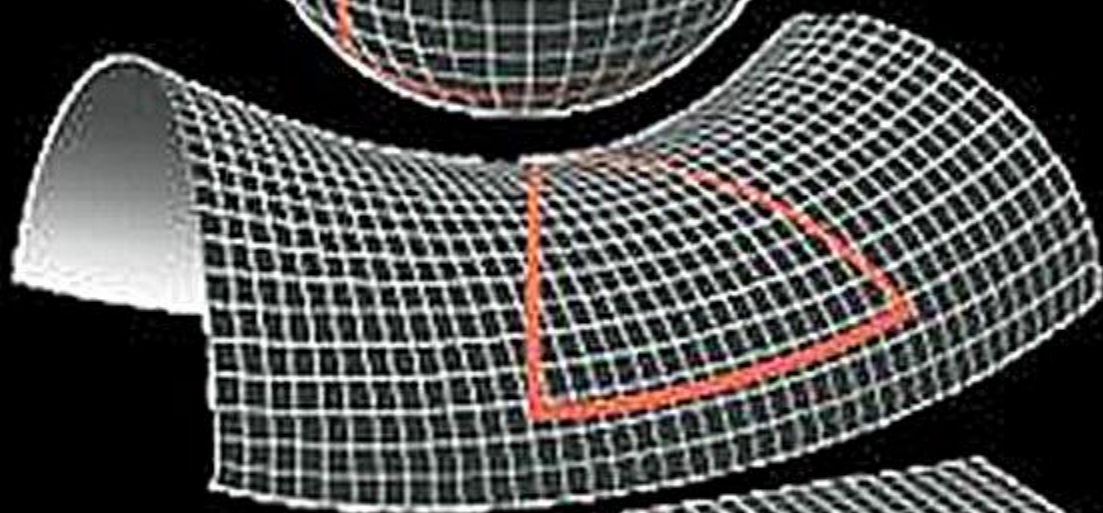
Qual'è la forma dell'Universo ?

- Una delle intuizioni più profonde della Relatività Generale è stata la conclusione che la massa causa la curvatura dello spazio, e i corpi che viaggiano nello spazio curvo vengono deviati nella loro traiettoria come se una forza agisse su di loro.

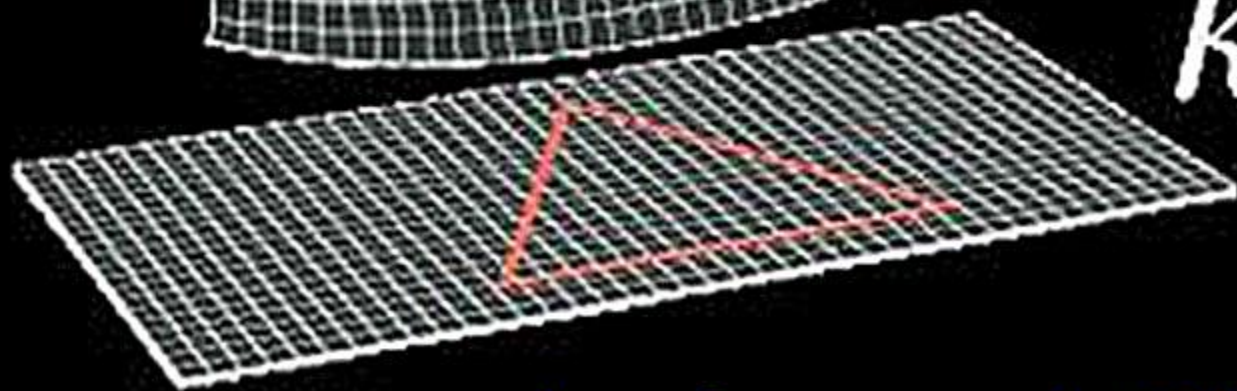




$$k = +1$$



$$k = -1$$



$$k = 0$$

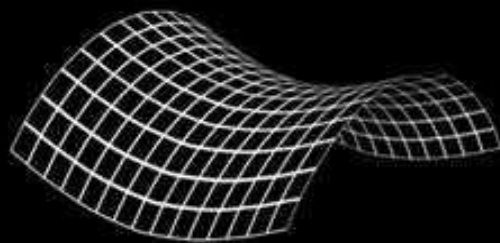
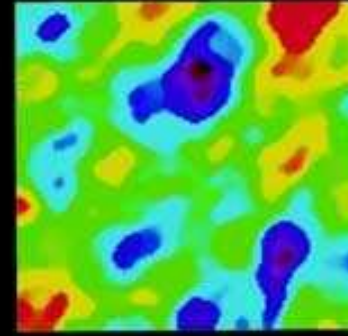
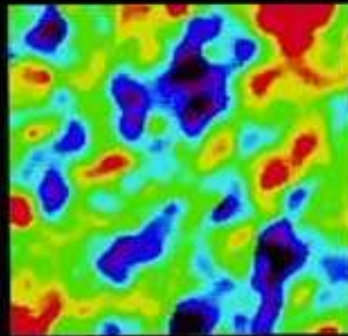
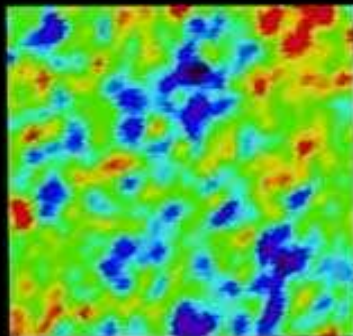
La forma dell'Universo?

L'Universo è aperto o chiuso?



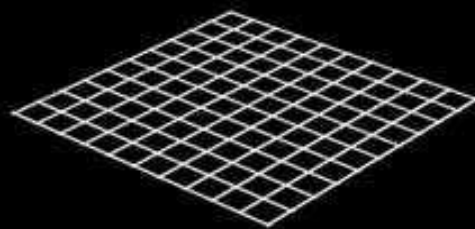
- Se lo spazio stesso è curvo, ci sono tre possibili geometrie per l'Universo. Ognuna di esse è legata alla quantità totale di massa dell'Universo (e quindi all'intensità totale della forza gravitazionale), e ciascuna implica un diverso passato e un diverso futuro per l'Universo.

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



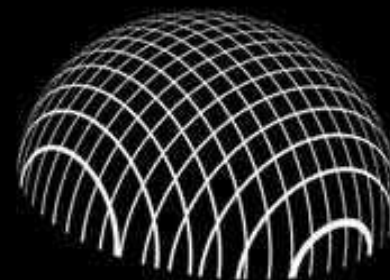
OPEN

Fluctuations largest on half-degree scale



FLAT

Fluctuations largest on
1-degree scale

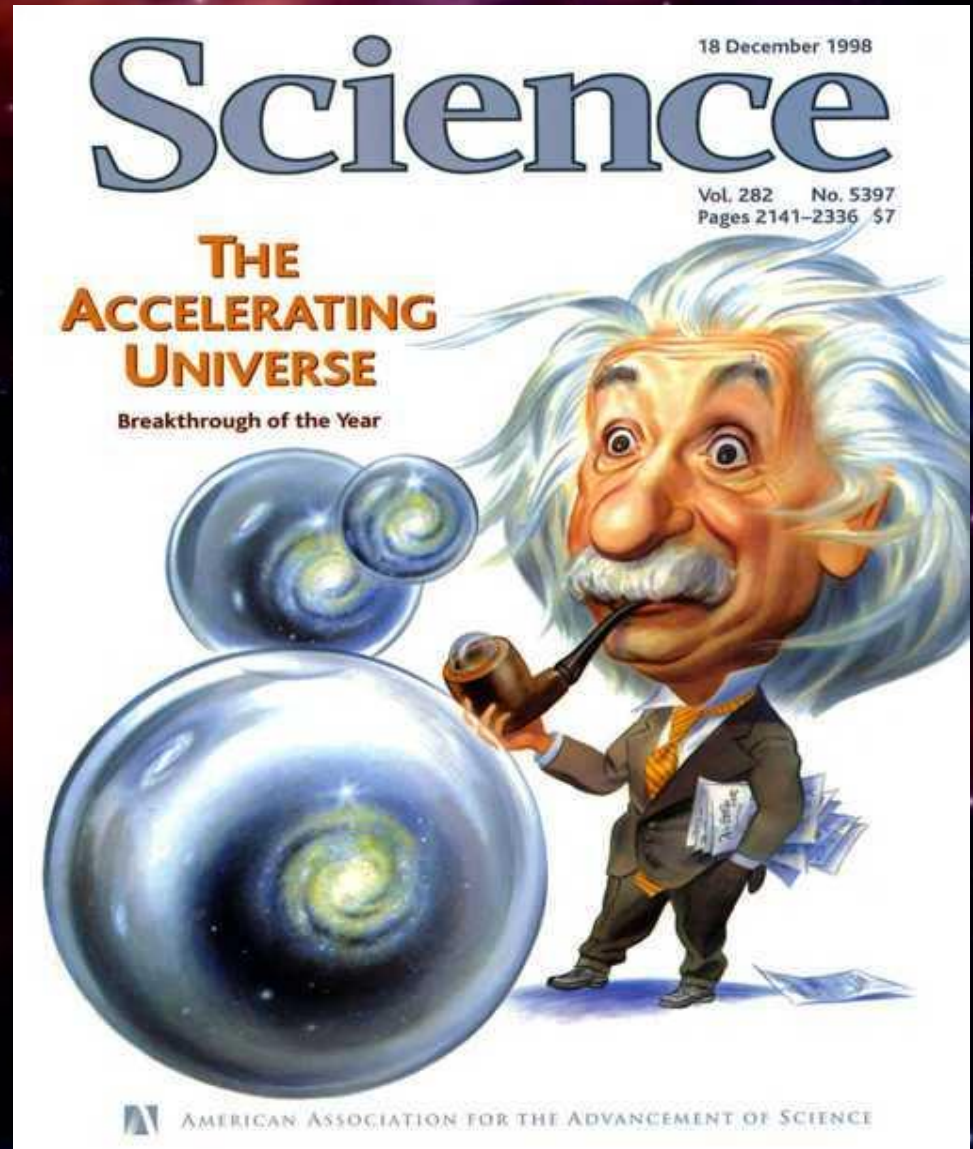


CLOSED

Fluctuations largest on
greater than 1-degree scale

L'espansione accelera?

- Gli studi portati avanti indipendentemente da due gruppi distinti, l' "High-z Supernova Search Team" ed il "Supernova Cosmology project" hanno portato ad una scoperta inaspettata.

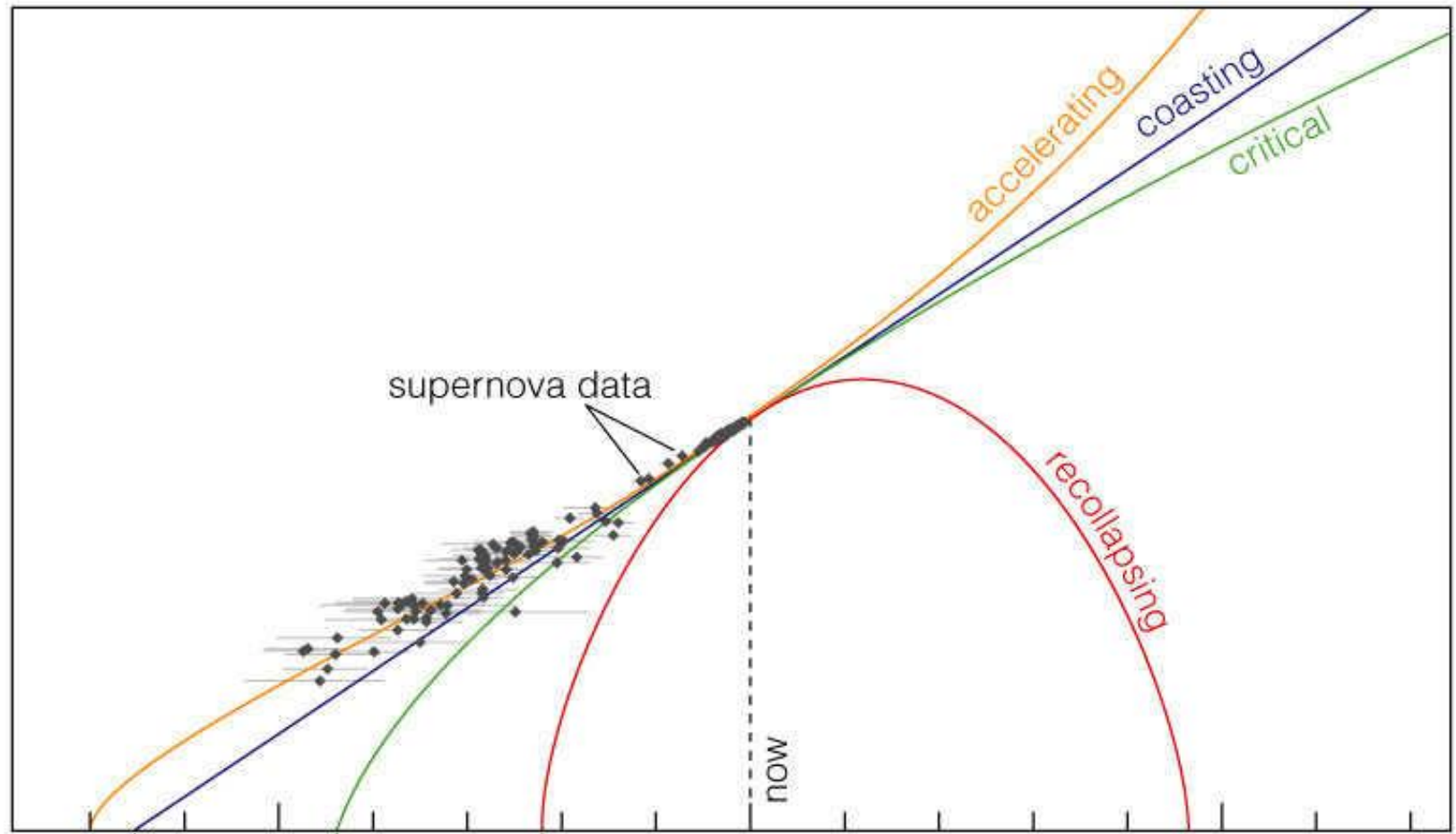


L'espansione accelera?

- Questi due gruppi di scienziati, studiando nella banda radio innumerevoli ammassi galattici e galassie che emettono getti di plasma, nonché studiando le curve di luce di diverse supernovae vicine, hanno dimostrato che:

l'espansione dell'Universo non sta rallentando, bensì accelerando.

average distance between galaxies
(based on redshift)



supernova data

now

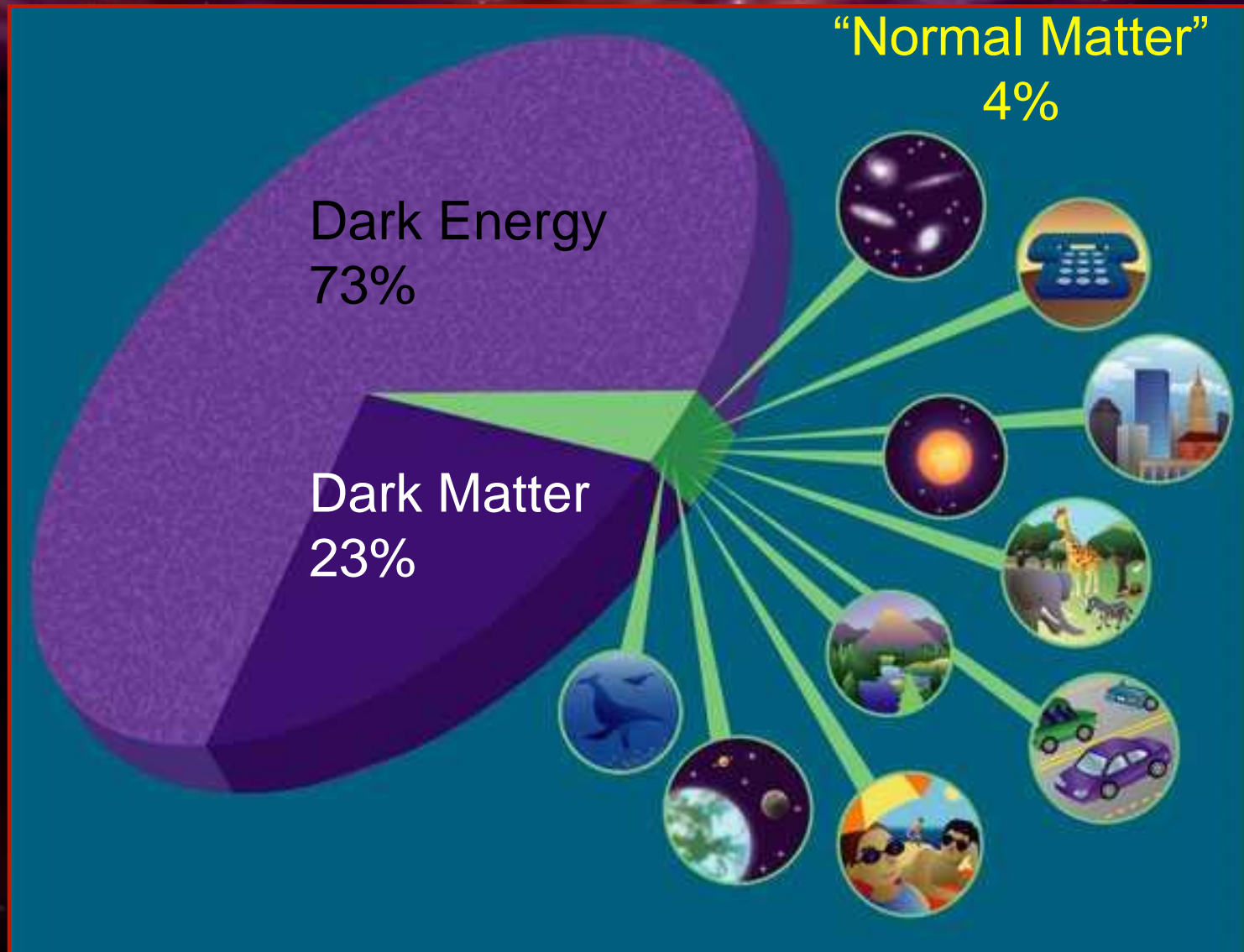
past ← → future

time in billions of years
(lookback times for supernovae
based on apparent brightness)

Einstein aveva ragione ?

- I dati dimostrano che l'espansione dell'universo non è rallentata, a causa della gravità, ma è in accelerazione.
- Ciò significa che esiste una forza che agisce contro la gravità.
- L'energia che provoca l'accelerazione è stata chiamata "energia del vuoto" o "energia oscura"
- Essa fornirebbe il 73% di densità necessaria a portare la densità dell'universo al valore critico, compatibile con le osservazioni astronomiche

Materia ed energia



Di cosa è fatta la Materia oscura?

- Neutrini ?
- Materia sotto forma di **Stelle nane**, poco luminose e quindi non visibili ?
- **WIMPS** , ovvero particelle massive poco interagenti (sono in corso ricerche agli acceleratori per produrle) ?

La ricerca sulla Materia oscura è una delle sfide della Fisica Moderna

Qual'è il futuro dell'Universo?

- Le sorti del nostro universo sono legate all'equilibrio che si instaurerà tra:
 - l'energia cinetica posseduta dalle galassie,
 - l'indice d'espansione,
 - la forza gravitazionale con cui i corpi celesti si attraggono.
- La densità critica definisce gli scenari

Il ritmo dell'espansione

- Potete immaginare la forza gravitazionale come a delle braccia con cui la materia può avvinghiarsi ad altra materia:
- se i corpi e le particelle sono abbastanza vicini da "afferrarsi" si avvicineranno sempre di più... e il nostro sarà un universo chiuso



Il ritmo dell'espansione

- Se sono già troppo lontani non riusciranno a toccarsi e si allontaneranno, in un universo aperto

la forza di gravità non è abbastanza forte...



... le particelle non riescono ad afferrarsi



Il punto di non ritorno

- Attualmente siamo in grado di prevedere solo quale sarà il

- punto di non ritorno:

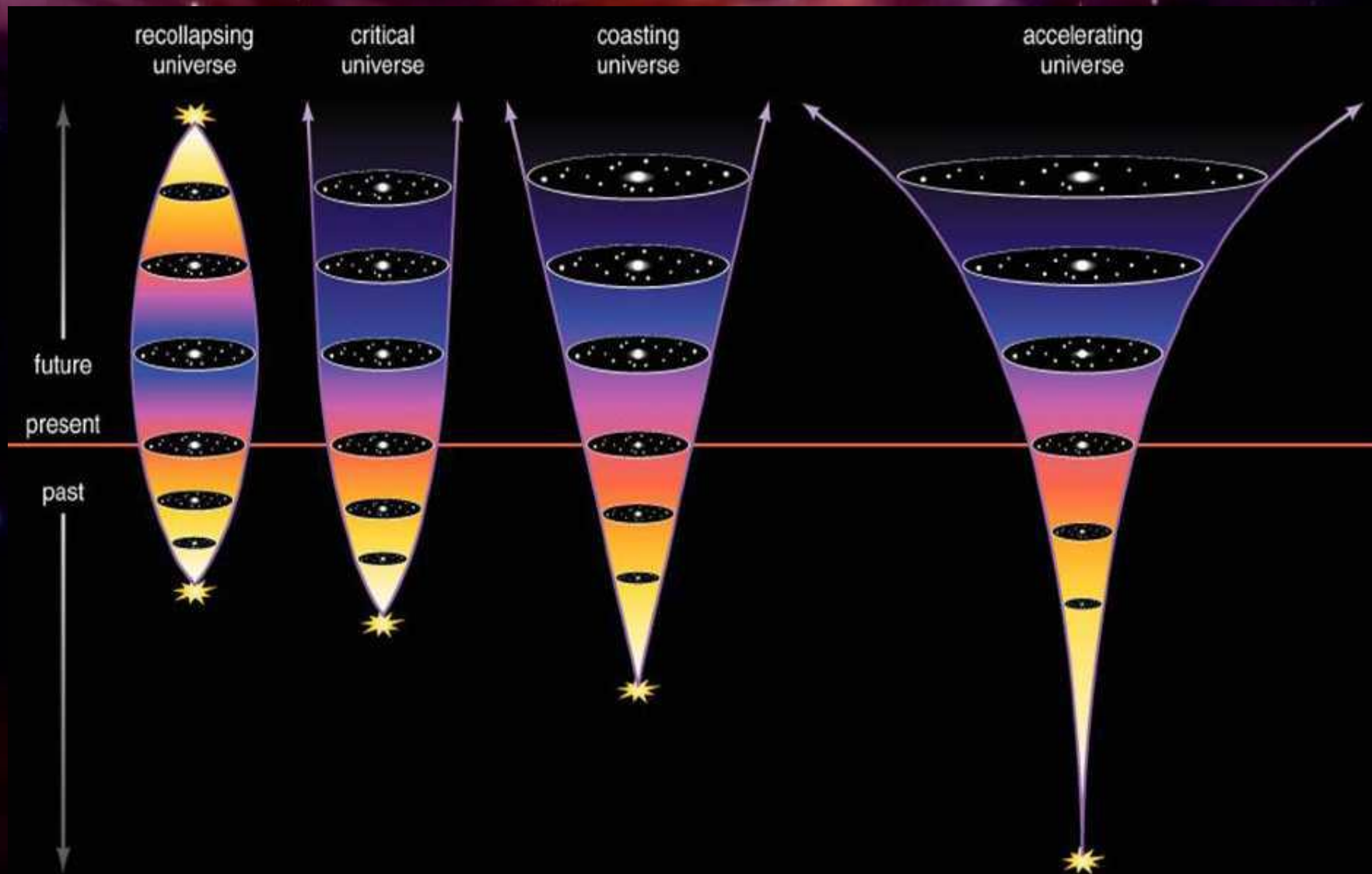
- » nel momento in cui per ogni cm^3 del nostro universo ci saranno meno di 5 atomi di idrogeno, l'attrazione gravitazionale tra i corpi celesti diventerà insufficiente a frenare la spinta espansionistica.

La densità critica

- E' proprio questo valore che viene definito **densità critica**, la linea di demarcazione tra un universo chiuso ed aperto.
- L'indice preso come punto di riferimento è Ω il cui valore è determinato dal rapporto tra la densità reale dell'universo, e la densità critica

$$\Omega = \text{densità reale} / \text{densità critica}$$

I modelli Cosmologici

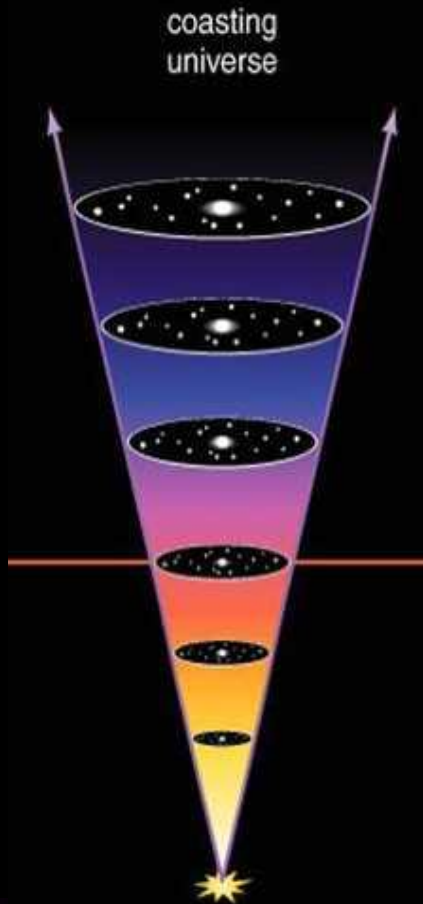


La fine dell'universo

1. Recollapsing Universe: l'espansione si ferma e l'universo collassa
2. Critical Universe: non collassa, si espande più lentamente
3. Coasting Universe: si espande all'infinito con velocità costante
4. Accelerating Universe*: l'espansione è sempre più accelerata con il tempo
*teoria attualmente più accreditata

La densità critica

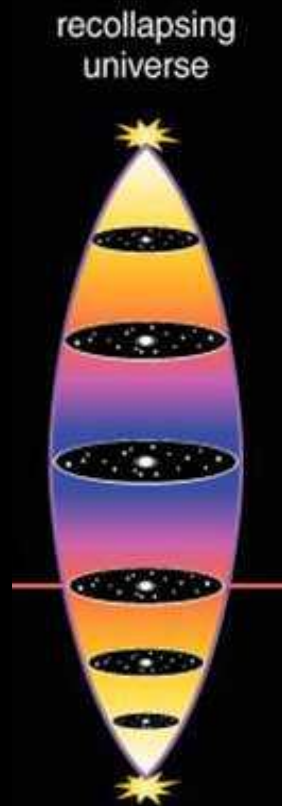
- Se il valore di Ω sarà al di sotto di 1 non si supererà



- non ci sarà abbastanza materia,
- si proseguirà in un'espansione all'infinito,
- il nostro universo avrà raggiunto la sua velocità di fuga...

La densità critica

- Se il valore di Ω sarà maggiore di 1



- la densità reale sarà maggiore delle densità critica
- ci sarà sufficiente materia per generare un'attrazione sempre più forte che porterà verso l'inversione di marcia:

- il *BIG CRUNCH* (la grande implosione)

La densità critica

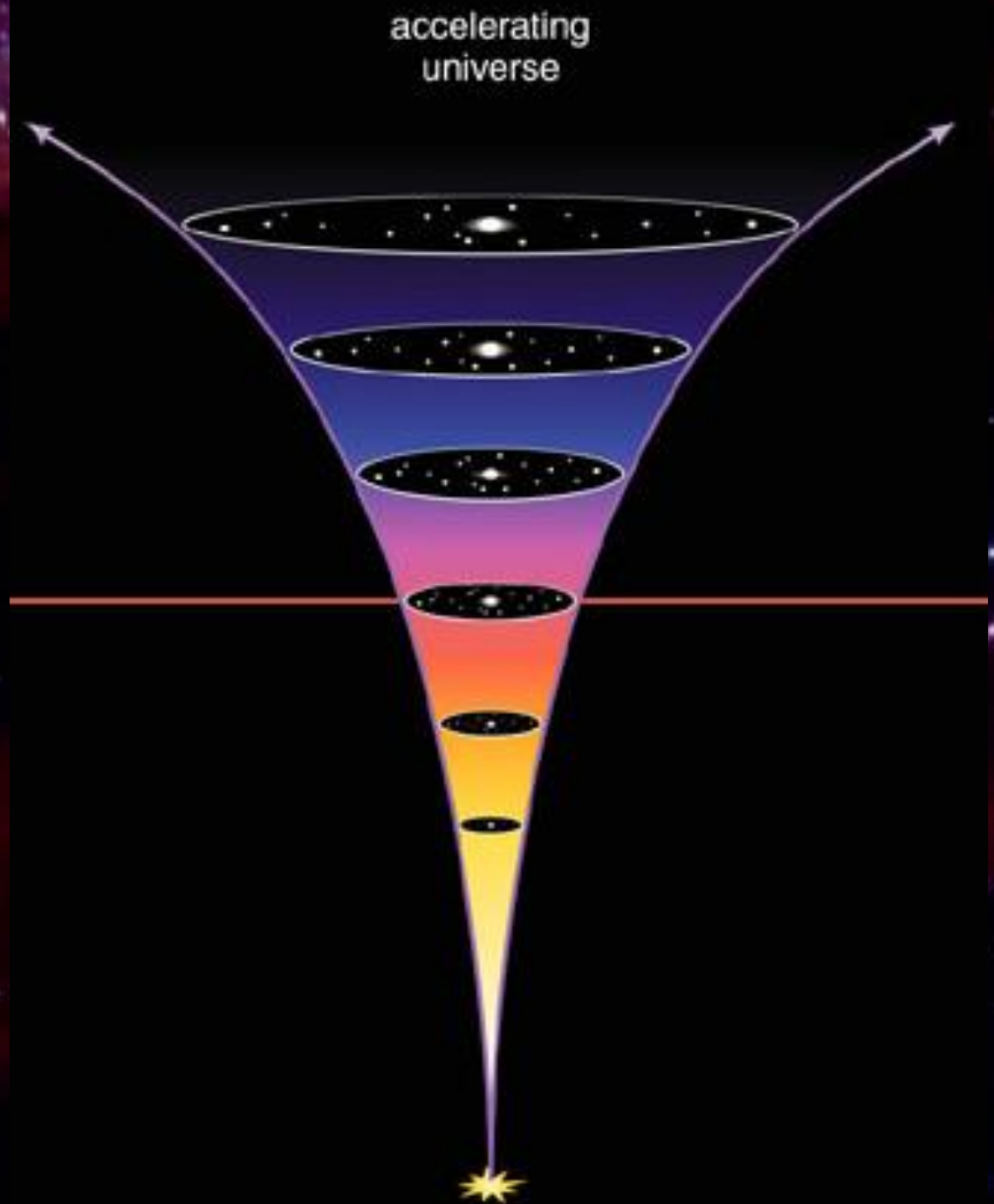
- Se il valore di Ω sarà uguale a 1



- ad un certo punto la spinta espansionistica dovrebbe rallentare, tendendo a zero senza mai giungervi.

Tuttavia
l'espansione
sembra
accelerare!

Dark
Energy ?



La visione attuale

Le recenti osservazioni astronomiche forniscono il seguente quadro dell'universo:

- Piano ed infinito
- In espansione accelerata (71 km/sec per mega parsec)
- Età dell'universo 13,7 miliardi di anni
- Temperatura media del fondo cosmico 2,735 gradi assoluti